



**Nuno Ricardo Figueiredo Tomás**

Mestre em Engenharia Mecânica

## **Modelação numérica de corpos flutuantes – extratores pontuais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil

Júri:

Presidente: Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso

Vogais: Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil

Doutor Marco Aurélio Araújo Alves



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Julho de 2014**



**Nuno Ricardo Figueiredo Tomás**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Modelação numérica de corpos flutuantes –  
extratores pontuais**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade  
Nova de Lisboa para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

**Julho de 2014**

## Modelação numérica de corpos flutuantes – extratores pontuais

**Nota:** Esta dissertação foi escrita ao abrigo do novo acordo ortográfico em vigor.

Copyright @ Nuno Ricardo Figueiredo Tomás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

## Agradecimentos

Ao Professor Luís Miguel Gil, meu orientador, agradeço a confiança depositada em mim, a orientação, as sugestões, revisões do texto, disponibilidade, compreensão e o apoio que foram imprescindíveis à realização desta dissertação.

Aos meus companheiros André Rodrigues, Rui Martins, David Nunes, André Monteiro, Guilherme Viegas, David Henriques, Carina Almeida e a tantos outros que me acompanharam e suportaram durante estes anos.

Aos meus pais e avós que desde sempre acreditaram em mim e me ajudaram em tudo na vida.

Obrigado a todos.



## Resumo

Os conversores pontuais de energia das ondas baseiam-se no movimento de um flutuador. Neste trabalho modela-se a resposta de um corpo flutuante quando excitado por ondas regulares e irregulares. Ao contrário da engenharia naval, onde se pretende minimizar os movimentos de um navio face à agitação, na conversão da energia das ondas interessa que o comportamento do corpo flutuante seja ressonante. No entanto, ambos os problemas são modelados pelos mesmos modelos matemáticos.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo numérico que permita conhecer o movimento do flutuador quando livre ou ligado a um sistema de conversão de energia *Power Take-off* (*PTO*). Nesta dissertação considera-se que o corpo tem apenas liberdade para efetuar movimentos de arfagem.

A resolução numérica da dinâmica do extrator apoia-se na teoria linear, sendo nesta dissertação efetuada com recurso ao código comercial *Ansys – AQWA*, de utilização comum em problemas *offshore*.

Numa primeira fase simulam-se situações para as quais existem resultados publicados na bibliografia, validando-se a metodologia utilizada. Posteriormente, estuda-se o comportamento do sistema de extração para ondas regulares e estados do mar típicos. Variam-se os coeficientes de amortecimento, elásticos e a massa quer do flutuador quer do sistema *PTO*, otimizando a extração de energia. Utilizam-se análises no tempo e na frequência.

O estudo permitiu concluir que é fundamental, do ponto de vista da eficiência energética, que o sistema funcione com características ressonantes, o que é conseguido quando a velocidade do flutuador está em fase com a força de excitação hidrodinâmica. O ajuste da condição de ressonância é conseguida variando os coeficientes elásticos e massa do *PTO* ou a massa do flutuador.

**Palavras-chave:** corpos flutuantes, energia das ondas, *Power Take-off*, ressonância.





## Abstract

Wave energy point absorbers are based upon the movement of a floater. In this thesis, the response of a floating body is modeled when excited by regular and irregular waves. Contrary to the naval engineering, where it is expected the minimization of the ship's movement; in the wave energy conversion it is important that the floating body has a resonant behavior. However, both this problems are modeled by the same mathematical models.

This thesis objective is the development of a numerical model that allows the floater's movement knowledge, when having a free movement or coupled to an energy converter system. In this dissertation only one degree of liberty is considered, allowing the heave movement.

The extractor's dynamical numerical solution is supported by the linear theory, which is performed by the commercial code *Ansys – AQWA*, a common resource in offshore problems.

Initially, situations in published results were simulated, validating the used methodology. After that, the extraction system is studied for regular waves and typical wave climates. Damping and elastic coefficients as well as the floater's mass and the power take-off mass are varied, optimizing the energy extraction. It will be used time and frequency analysis.

This study offers the conclusion that it is fundamental, from an energy efficiency point of view that the system operates with resonant characteristics, which is accomplished when the floater's velocity is in phase with the hydrodynamic excitation force. The resonant condition adjustment is accomplished by varying the elastic coefficient and mass of the PTO or the floater's mass.

**Keywords:** floating bodies, wave energy, Power Take-off, resonance.



# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.2 DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS.....	2
1.3 METODOLOGIA.....	3
1.4 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
<b>2. ESTUDO BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>5</b>
2.1 CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA DAS ONDAS .....	5
2.2 TEORIA LINEAR DAS ONDAS.....	7
2.3 O PROBLEMA DE RADIAÇÃO/DIFRAÇÃO E A ABSORÇÃO DE ENERGIA .....	9
2.4 MODELAÇÃO MATEMÁTICA DE UM CORPO FLUTUANTE.....	11
2.4.1 <i>Equação de Laplace e Condições de fronteira</i> .....	12
2.4.2 <i>Decomposição do potencial e problemas de radiação e difração</i> .....	13
2.4.3 <i>Pressões e forças</i> .....	14
2.5 ONDAS IRREGULARES.....	20
2.6 CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA PTO NO MOVIMENTO DE ARFAGEM.....	21
2.6.1 <i>Potência absorvida e condições ótimas do sistema PTO</i> .....	22
<b>3. CÓDIGO NUMÉRICO AQWA.....</b>	<b>25</b>
3.1 <i>HYDRODYNAMIC DIFRACTION</i> .....	26
3.2 <i>HYDRODYNAMIC TIME RESPONSE</i> .....	27
3.3 TRATAMENTO DE DADOS.....	27
<b>4. TESTES DE VALIDAÇÃO DE PROCEDIMENTOS.....</b>	<b>31</b>
4.1 TESTE DE VALIDAÇÃO PARA FLUTUADORES COM MOVIMENTO LIVRE.....	31
4.1.1 <i>Domínio das frequências</i> .....	31
4.1.2 <i>Domínio temporal</i> .....	39
4.2 VALIDAÇÃO DE UM FLUTUADOR SUJEITO A LIGAÇÃO COM SISTEMA <i>PTO</i> ( <i>POWER TAKE- OFF</i> ).....	40
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
5.1 RESPOSTA A UMA ONDA REGULAR .....	45
5.1.1 <i>Situação A</i> .....	45
5.1.2 <i>Situação B</i> .....	49
5.1.3 <i>Situação C</i> .....	52
5.2 RESPOSTA A ONDAS IRREGULARES.....	55
5.2.1 <i>Clima de ondas</i> .....	55
5.2.2 <i>Situação A</i> .....	57

## *Índice*

5.2.3 Situação B.....	60
5.2.4 Situação C.....	62
5.3 DIMINUIÇÃO DA AMPLITUDE DE RESPOSTA.....	65
<b>6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>71</b>

# Índice de figuras

FIGURA 1.1 – TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA ONDA – ELETRICIDADE. ....	1
FIGURA 1.2 – ESQUEMA DO SISTEMA EM ESTUDO. ....	2
FIGURA 1.3 – METODOLOGIA A IMPLEMENTAR. ....	3
FIGURA 2.1 – SISTEMA DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE. (PAREDES ET AL., 2008).....	5
FIGURA 2.2 – SISTEMA DE PLACA ARTICULADA NO FUNDO. (PAREDES ET AL., 2008).....	6
FIGURA 2.3 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM DISPOSITIVO POR GALGAMENTO <i>OFFSHORE</i> . (IKIONRENEWABLEENERGY, 2010).....	6
FIGURA 2.4 - SOBREPOSIÇÃO DOS PROBLEMAS DE DIFRAÇÃO E DE RADIAÇÃO (SANTOS, 2006). ....	9
FIGURA 2.5 – A. ONDA NÃO PERTURBADA; B. ONDAS (SIMÉTRICAS) RADIADAS PELOS CORPOS FLUTUANTES OSCILANDO VERTICALMENTE (EM ÁGUA CALMA); C. ONDAS (ANTI-SIMÉTRICAS) GERADAS PELOS CORPOS FLUTUANTES OSCILANDO HORIZONTALMENTE (EM ÁGUA CALMA); D. SOBREPOSIÇÃO (SOMA) DAS TRÊS ONDAS ACIMA E CONSEQUENTE ABSORÇÃO COMPLETA DA ENERGIA DA ONDA INCIDENTE (FALNES, 2002). ....	10
FIGURA 2.6 – OS SEIS GRAUS DE UM FLUTUADOR EM MOVIMENTO LIVRE. ....	11
FIGURA 2.7 – REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DO SISTEMA (FLUTUADOR LIVRE). ....	18
FIGURA 2.8 – DIFERENTES ZONAS DE FREQUÊNCIA DA AMPLITUDE DE RESPOSTA ( <i>RAO</i> ) PARA UM FLUTUADOR GENÉRICO NO MODO DE ARFAGEM. (JOURNÉE E MASSIE,2001).....	19
FIGURA 2.9 – PRINCÍPIO DA TRANSFERÊNCIA DE ONDAS IRREGULARES PARA RESPOSTAS (JOURNÉE E MASSIE,2001). .....	20
FIGURA 2.10 – FLUTUADOR COM SISTEMA <i>PTO</i> (SIMPLIFICAÇÃO DO SISTEMA). ....	21
FIGURA 3.1 - ORDEM DE PROCEDIMENTOS USADOS NO <i>AQWA</i> .....	25
FIGURA 3.2 - PROCEDIMENTOS PARA O CÁLCULO DOS COEFICIENTES NO DOMÍNIO DAS FREQUÊNCIAS. ....	26
FIGURA 3.3 – ESTRUTURA DO COMPONENTE <i>HYDRODYNAMIC TIME RESPONSE</i> .....	27
FIGURA 3.4 – FLUXOGRAMA : SIMULAÇÃO – TRATAMENTO – APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS .....	28
FIGURA 4.1- MALHA UTILIZADA NO PROGRAMA <i>WAMIT</i> (PAREDES ET AL.,2008).....	31
FIGURA 4.2- COEFICIENTE ADIMENSIONAL DE AMORTECIMENTO $BHID^*$ .....	33
FIGURA 4.3- COEFICIENTE ADIMENSIONAL DE MASSA ADICIONADA $MA^*$ . ....	33
FIGURA 4.4- AMPLITUDE DE RESPOSTA ( <i>RAO</i> ). ....	33
FIGURA 4.5- ÂNGULO DE FASE ENTRE A RESPOSTA DO FLUTUADOR E A ONDA INCIDENTE. ....	33
FIGURA 4.6- MÓDULO DA FORÇA DE EXCITAÇÃO $Fex^*$ .....	33
FIGURA 4.7- ÂNGULO DE FASE ENTRE A FORÇA DE EXCITAÇÃO $Fex^*$ E A ONDA INCIDENTE. ....	33
FIGURA 4.8- COEFICIENTE ADIMENSIONAL DE AMORTECIMENTO $BHID^*$ .....	34
FIGURA 4.9- COEFICIENTE ADIMENSIONAL DE MASSA ADICIONADA $MA^*$ . ....	34
FIGURA 4.10- AMPLITUDE DE RESPOSTA ( <i>RAO</i> ).....	35
FIGURA 4.11- ÂNGULO DE FASE ENTRE A RESPOSTA DO FLUTUADOR E A ONDA INCIDENTE. ....	35
FIGURA 4.12- MÓDULO DA FORÇA DE EXCITAÇÃO $Fex^*$ .....	35
FIGURA 4.13- ÂNGULO DE FASE ENTRE A FORÇA DE EXCITAÇÃO $Fex^*$ E A ONDA INCIDENTE. ....	35
FIGURA 4.14 - COEFICIENTES ADIMENSIONAIS DE AMORTECIMENTO HIDRODINÂMICO $BHID^*$ . ....	37
FIGURA 4.15 - COEFICIENTES ADIMENSIONAIS DE MASSA ADICIONADA $MA^*$ .....	37

FIGURA 4.16 - MÓDULO DA FORÇA DE EXCITAÇÃO $F_{EX}^*$ .....	38
FIGURA 4.17 – ÂNGULO DE FASE ENTRE A FORÇA DE EXCITAÇÃO $F_{EX}^*$ E A ONDA INCIDENTE.....	38
FIGURA 4.18- MODO DE ARFAGEM (BACKER, 2010).....	39
FIGURA 4.19-MODO DE ARFAGEM CALCULADO NO <i>AQWA</i> (AUTOR). ....	39
FIGURA 4.20- AMPLITUDE DE RESPOSTA ( $RAO$ ) PARA O SISTEMA COM E SEM $PTO$ . ....	41
FIGURA 5.1 – DIMENSÕES DO FLUTUADOR CÔNICO.....	43
FIGURA 5.2 – $RAO$ DO FLUTUADOR COM MOVIMENTO LIVRE. ....	44
FIGURA 5.3 – AMPLITUDE DE RESPOSTA $RAO$ COM $PTO$ ( $k_{PTO}$ NULO). ....	45
FIGURA 5.4 – RESPOSTA DO FLUTUADOR E ONDA (0,1 Hz). ....	46
FIGURA 5.5 - RESPOSTA DO FLUTUADOR E ONDA (0,4 Hz). ....	46
FIGURA 5.6 - RESPOSTA DO FLUTUADOR E ONDA (RESSONÂNCIA). ....	46
FIGURA 5.7 – POTÊNCIA ABSORVIDA ADIMENSIONAL ( $k_{PTO} = 0$ ). ....	48
FIGURA 5.8 – POTÊNCIA ABSORVIDA AO LONGO DO TEMPO ( $k_{PTO} = 0$ ). ....	49
FIGURA 5.9 - AMPLITUDE DE RESPOSTA $RAO$ NA SITUAÇÃO A E B. ....	50
FIGURA 5.10 - RESPOSTA NO TEMPO DO FLUTUADOR E DA SUPERFÍCIE LIVRE (RESSONÂNCIA). ....	51
FIGURA 5.11 - POTÊNCIA ABSORVIDA ADIMENSIONAL ( $k_{PTO}$ IDEAL). ....	52
FIGURA 5.12 – COMPARAÇÃO DE $RAO$ ENTRE A SITUAÇÃO A, B E C.....	54
FIGURA 5.13 – POTÊNCIA ABSORVIDA ADIMENSIONAL (SITUAÇÃO C).....	54
FIGURA 5.14 – ESPECTRO CORRESPONDENTE AO ESTADO DE MAR Nº 11. ....	57
FIGURA 5.15 – $RAO$ NA SITUAÇÃO A. ....	58
FIGURA 5.16 – ESPECTRO DE RESPOSTA PARA A SITUAÇÃO A.....	58
FIGURA 5.17 – MOVIMENTO DE ARFAGEM DO FLUTUADOR (SITUAÇÃO A).....	59
FIGURA 5.18 – ESPECTRO DE AMPLITUDES DA ..... RESPOSTA (SITUAÇÃO A). ....	59
FIGURA 5.19 – POTÊNCIA ABSORVIDA AO LONGO DE 50 s (SITUAÇÃO A). ....	60
FIGURA 5.20 – $RAO$ NA SITUAÇÃO B. ....	61
FIGURA 5.21 – ESPECTRO DE RESPOSTA PARA A SITUAÇÃO B. ....	61
FIGURA 5.22 – MOVIMENTO DE ARFAGEM DO FLUTUADOR.....	62
FIGURA 5.23 – ESPECTRO DE RESPOSTA (SITUAÇÃO B).....	62
FIGURA 5.24 – $RAO$ NA SITUAÇÃO C. ....	63
FIGURA 5.25 – ESPECTRO DE RESPOSTA PARA A SITUAÇÃO C. ....	63
FIGURA 5.26 – MOVIMENTO DE ARFAGEM DO FLUTUADOR.....	64
FIGURA 5.27 – ESPECTRO DE AMPLITUDES DE ..... RESPOSTA (SITUAÇÃO C).....	64
FIGURA 5.28 – COMPARAÇÃO DO $RAO$ ENTRE SISTEMAS COM E SEM RESTRIÇÃO DE MOVIMENTO. ....	66
FIGURA 5.29 - MOVIMENTO DE ARFAGEM DO FLUTUADOR. ....	67

## Índice de Tabelas

TABELA 3.1 – ROTINA PARA CÁLCULO DA <i>FFT</i> . .....	29
TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS DO FLUTUADOR (PAREDES <i>ET AL.</i> , 2008). .....	32
TABELA 4.2 - CARACTERÍSTICAS DO FLUTUADOR A DINAMICAMENTE SEMELHANTE. ....	34
TABELA 4.3 - CARACTERÍSTICAS DO FLUTUADOR CILÍNDRICO. ....	36
TABELA 4.4- CARACTERÍSTICAS DO FLUTUADOR DO (BACKER, 2010). ....	39
TABELA 4.5- CARACTERÍSTICAS DO ESPECTRO DE ONDA IRREGULAR ( $H_s$ A ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA, $F_s$ A FREQUÊNCIA DE PICO) (BACKER, 2010). ....	39
TABELA 4.6- DISTÂNCIA PERCORRIDA EM ARFAGEM CALCULADA PELO AUTOR E POR (BACKER, 2010). ....	40
TABELA 4.7- CARACTERÍSTICAS DO FLUTUADOR HEMISFÉRICO. ....	40
TABELA 4.8- CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA <i>PTO</i> . ....	41
TABELA 4.9 – POTÊNCIA ABSORVIDA, POTÊNCIA ABSORVIDA MÁXIMA E A PERCENTAGEM DE ERRO ENTRE OS DOIS .....	42
TABELA 5.1- CARACTERÍSTICAS DE ESTADO DO MAR (HENRIQUES <i>ET AL.</i> , 2011) .....	56
TABELA 5.2 – CARACTERÍSTICAS DO <i>PTO</i> (SITUAÇÃO A). ....	57
TABELA 5.3 - CARACTERÍSTICAS DO <i>PTO</i> . ....	60
TABELA 5.4 – CARACTERÍSTICAS DO <i>PTO</i> (SITUAÇÃO C). ....	62
TABELA 5.5 – POTÊNCIA ABSORVIDA MÉDIA CALCULADA NAS SITUAÇÕES A,B E C. ....	64
TABELA 5.6 - POTÊNCIA ABSORVIDA MÉDIA PARA OS SISTEMAS NA SITUAÇÃO A, SITUAÇÃO B E SITUAÇÃO B COM RESTRIÇÃO DE MOVIMENTOS. ....	67





## Lista de abreviaturas

<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<i>PTO</i>	<i>Power Take-off</i>
<i>RAO</i>	<i>Response Amplitude Operator</i>
<i>WAMIT</i>	<i>Wave A Mashuchit I T</i>



## Simbologia

$b_{hid}$	Coeficiente de amortecimento hidrodinâmico.
$b_{hid}^*$	Coeficiente adimensional de amortecimento hidrodinâmico.
$b_{PTO}$	Coeficiente de amortecimento do sistema <i>PTO</i> .
$d$	Diâmetro do flutuador.
$f$	Frequência de onda.
$f_s$	Frequência de pico de um espectro de ondas.
$g$	Aceleração gravítica.
$h$	Profundidade do mar.
$k$	Coeficiente hidrostático de restituição.
$k_{PTO}$	Coeficiente elástico do sistema <i>PTO</i> .
$k_w$	Número de onda.
$m$	Massa do flutuador.
$m_a$	Coeficiente de massa adicionada.
$m_a^*$	Coeficiente adimensional de massa adicionada.
$m_{PTO}$	Massa adicional do sistema <i>PTO</i> .
$n$	Vetor normal à superfície de um corpo.
$p$	Pressão a atuar numa partícula de fluido.
$t$	Tempo.
$v_n$	Componente normal da velocidade de um corpo.
$z_A$	Amplitude do movimento no modo de arfagem.
$z_B$	Coordenada do centro de impulsão.
$z_g$	Distância do centro de gravidade do flutuador à linha de água.
$z_G$	Coordenada do centro de gravidade.
$\dot{z}$	Velocidade no modo de arfagem.
$A_w$	Área do flutuador na linha de água no equilíbrio hidrostático.
$C$	Celeridade de propagação de onda.

## Simbologia

$F$	Fluxo médio de energia.
$F_{ex}$	Força de excitação.
$F_{ex}^*$	Força de excitação adimensional.
$F_{PTO}$	Força a atuar no sistema <i>PTO</i> .
$F_{rad}$	Força de radiação.
$F_{res}$	Força de restituição.
$H_s$	Altura de onda significativa.
$K_p$	Fator de atenuação da pressão.
$P_{abs}$	Potência absorvida.
$P_{abs}^*$	Potência absorvida adimensional.
$P_{abs,max}$	Potência absorvida máxima.
$P_{ex}$	Potência de excitação.
$P_{rad}$	Potência de radiação.
$S_b$	Superfície do corpo.
$S_z(\omega)$	Energia espectral da resposta de arfagem, em função da frequência.
$S_\zeta(\omega)$	Energia espectral de ondas irregulares em função da frequência.
$T$	Período de onda.
$V_D$	Volume deslocado.
$\gamma$	Fator de tipo de pico no espectro.
$\zeta$	Superfície livre.
$\zeta_A$	Amplitude de uma onda não perturbada.
$\lambda$	Comprimento de onda.
$\zeta_i$	Vetor de deslocamentos e rotações de um corpo no modo $i$ .
$\rho$	Massa volúmica do fluido.
$\varphi_F$	Ângulo de fase entre a força de excitação e a onda incidente.
$\varphi_u$	Ângulo de fase entre a velocidade do flutuador e a onda incidente.
$\phi$	Potencial de velocidade.
$\phi_0$	Potencial de velocidade de uma onda regular progressiva incidente.

$\phi_D$  Potencial de difração.

$\phi_{rad}$  Potencial de radiação.

$\omega$  Frequência angular.



# 1. Introdução.

## 1.1 Contextualização do problema.

A energia das ondas é uma fonte energética renovável não poluente criada pela conversão natural da energia do vento na superfície dos oceanos. Em Portugal, estima-se que a energia transportada por metro de frente de onda seja de  $50 \text{ kW/m}$  a  $100 \text{ kW/m}$  (Falnes e Hals, 1999). Assim, existem boas perspetivas quanto ao desenvolvimento comercial de centrais de extração de energia das ondas, que no futuro poderão tornar-se componentes fulcrais no sistema energético das nações com importantes regiões costeiras.

Variados tipos de conversores de energia das ondas têm sido desenvolvidos e apesar de ainda não se ter chegado a uma solução ótima, várias famílias de conversores estão bem definidas e com vários protótipos desenvolvidos. Apesar de tecnologicamente distintos, os conceitos base de transferência energética são os mesmos, como apresentado na figura 1.1.

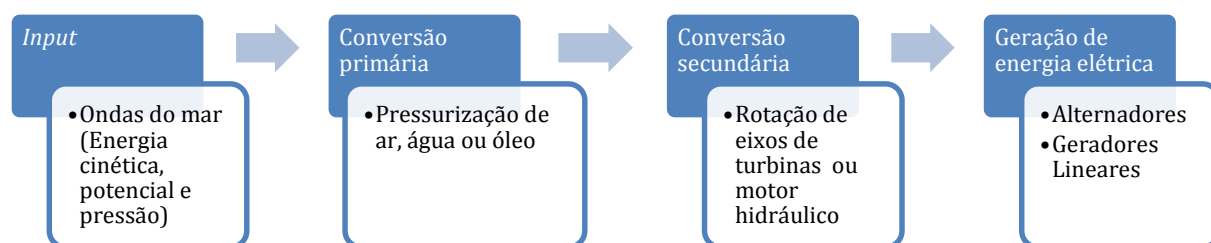


Figura 1.1 – Transferência de energia Onda – Eletricidade.

Desde o séc. XIX que têm sido propostas soluções para o aproveitamento do movimento oscilatório da agitação marítima. No entanto, não foi ainda encontrada uma solução comprovadamente rentável para a utilização comercial como a que existe para o aproveitamento da energia eólica. São várias as dificuldades que surgem quando se tenta encontrar uma solução economicamente viável, nomeadamente, o custo elevado inerente a uma construção *offshore* ou o mais baixo recurso energético numa localização *onshore*.

A aleatoriedade do recurso, aliado à agressividade do meio, permitem identificar dificuldades específicas desta tecnologia (C.R.E.S., 2002):

- A aleatoriedade na amplitude, fase e direção das ondas, o que dificulta a otimização do dispositivo;
- Condições meteorológicas extremas, os esforços a que estas estruturas ficam sujeitas podem atingir valores 100 vezes maiores que o nominal;

- A gama de frequências das ondas (0,1 Hz) é de mais de duas ordens de grandeza inferior à da frequência da eletricidade comercial.

## 1.2 Descrição do dispositivo de aproveitamento de energia das ondas.

O sistema de extração de energia das ondas em que se apoia este estudo tem base num sistema de corpos oscilantes, aqui apresentado na figura 1.2.

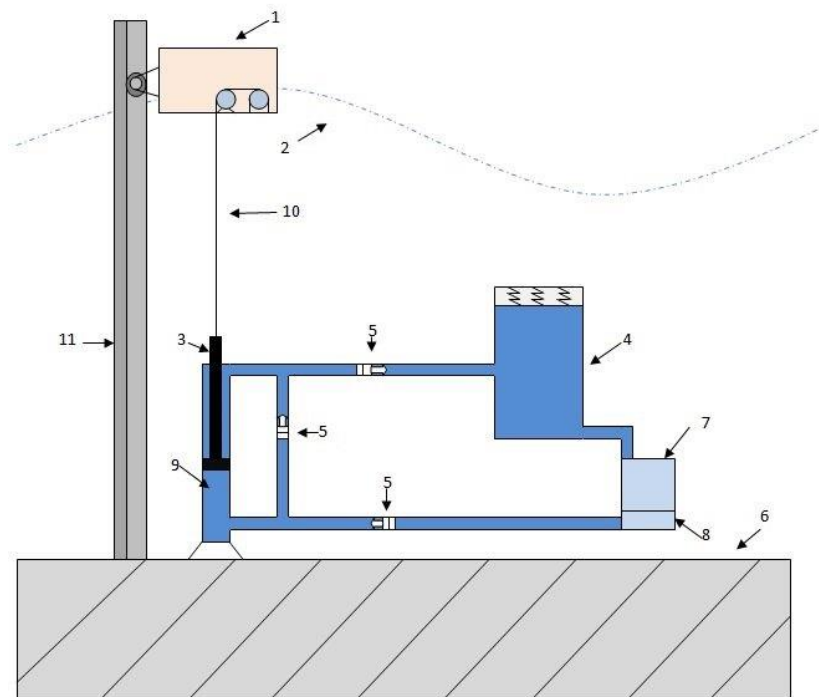


Figura 1.2 – Esquema do sistema em estudo.

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| 1 – Flutuador                | 7 – Turbina de <i>Pelton</i> (fluido – água) |
| 2 – Linha de água            | 8 – Descarregador                            |
| 3 – Pistão                   | 9 – Cilindro                                 |
| 4 – Reservatório de Pressão  | 10 – Cabo                                    |
| 5 – Válvula de sentido único | 11 – Suporte do flutuador                    |
| 6 – Fundações                |  |

O elemento impulsionador do movimento do pistão é o flutuador, alimentado pelo movimento vertical provocado pela ondulação. Assim, os elementos 3 e 9, funcionam como uma bomba volumétrica



que cria pressão no fluido, este é transportado para o reservatório de pressão, que o transfere a fluxo constante para a turbina de *Pelton*, gerando energia elétrica.

O projeto deste sistema divide-se em várias fases, nomeadamente, a otimização da geometria do flutuador, projeto do sistema êmbolo-cilindro, reservatório de pressão constante, escolha da turbina, tubulação e ancoragem do sistema.

Dependendo da geometria e massa do flutuador, maior ou menor potência será possível extrair, sendo precisamente para estudar essa problemática que esta dissertação pretende contribuir.

### 1.3 Metodologia.

A metodologia utilizada nesta dissertação é dividida em quatro partes, como se pode verificar na figura 1.3.

Numa primeira fase foi necessário efetuar um estudo bibliográfico. Nesta fase aborda-se a teoria linear das ondas que descreve a dinâmica e a cinemática da agitação marítima, assim como os métodos lineares de análise da interação dinâmica de uma estrutura flutuante com esse campo de ondas.

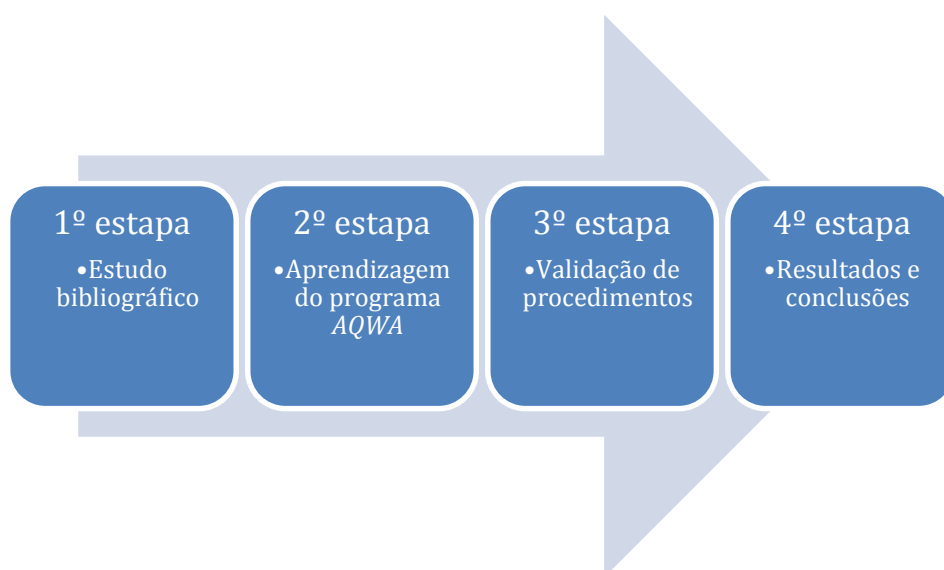


Figura 1.3 – Metodologia a implementar.

Na segunda fase procede-se à familiarização com o programa AQWA, nomeadamente os dados de entrada e de saída, geração de malha e métodos numéricos utilizados.

Na terceira etapa validam-se os procedimentos. Confirma-se que o autor apreendeu os fundamentos do programa e que executa com precisão as simulações, comparando-se com resultados bem documentados.

Na quarta etapa apresentam-se os resultados, são formuladas as conclusões e sugerem-se trabalhos futuros.

## 1.4 Objetivos da dissertação.

Com esta dissertação pretende-se contribuir para a simulação numérica de extratores de energia das ondas do tipo pontual.

A utilização do código *AQWA* não está amplamente difundida entre a comunidade técnica desta área, estando mais ligada a situações de construção *offshore*. Aproveita-se assim a oportunidade de utilizar uma nova ferramenta que poderá trazer contributos para este tipo de estudos.

O principal objetivo deste estudo é o desenvolvimento de uma metodologia que permita maximizar a potência extraída num sistema com um flutuador em arfagem ligado a um sistema *Power Take-off (PTO)*.

As simulações numéricas são efetuadas com o programa *AQWA (Ansys, Inc.)* que possibilita o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos que permitem descrever o movimento do flutuador, assim como a resposta desse ao longo do tempo e no domínio da frequência.

Ao autor, para além de contribuir cientificamente nesta área, permite-lhe melhorar os seus conhecimentos de simulação numérica, nomeadamente ao nível da hidrodinâmica.

## 1.5 Estrutura da dissertação.

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, nomeadamente:

- **Capítulo 1** – É contextualizado o problema, apresentando o sistema que serve como ponto de partida para a dissertação. São também referenciadas as metodologias e os objetivos a atingir.
- **Capítulo 2** – São apresentados diversos sistemas de extração de energia. São desenvolvidos os fundamentos matemáticos da agitação marítima (teoria linear das ondas), assim como as equações dos movimentos e forças de corpos que interagem com um campo de ondas. São ainda abordados os espectros de ondas e os métodos que permitem o cálculo da potência absorvida.
- **Capítulo 3** – Apresenta-se a estrutura do programa *AQWA* identificando-se os dados de entrada e saída.
- **Capítulo 4** – Procede-se à validação de procedimentos de cálculo no programa *AQWA*. Comparam-se resultados numéricos de outros autores por forma a validar a capacidade do autor em efetuar simulações.
- **Capítulo 5** – Obtêm-se resultados com vista à otimização da extração de energia e à modelação numérica do fenómeno.
- **Capítulo 6** – Retiram-se conclusões e apresentam-se propostas para a continuação dos trabalhos.

## 2. Estudo bibliográfico

### 2.1 Classificação de sistemas de aproveitamento de energia das ondas

- **Coluna de água oscilante.**

Um sistema de coluna de água oscilante é um sistema com aplicabilidade *onshore* ou *offshore*. Quando uma onda se aproxima da estrutura, esta é capturada numa câmara semi-submersa pressurizando o ar que está aprisionado e forçando-o a deslocar-se para a turbina, esta gerará energia elétrica. Quando a onda se retrai, o ar volta a entrar na câmara de ar. O sistema é apresentado na figura 2.1 para uma estrutura costeira.

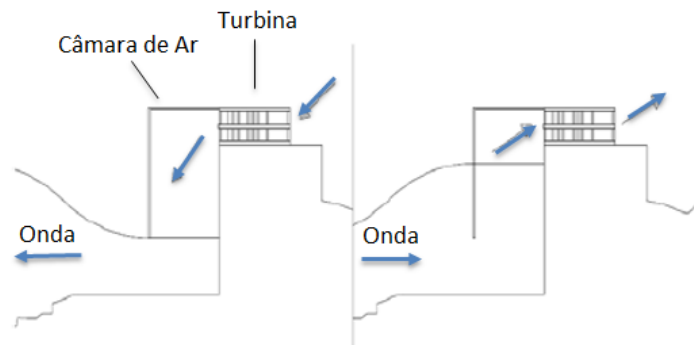


Figura 2.1 – Sistema de coluna de água oscilante. (Paredes et al., 2008)

- **Placa articulada no fundo.**

Este sistema tira proveito da componente horizontal do campo de velocidades da ondulação e é principalmente adequado para águas pouco profundas. A estrutura consiste numa placa articulada totalmente ou parcialmente submersa (figura 2.2). A passagem de uma onda cria uma rotação em torno da articulação. A rotação da placa faz atuar um sistema de produção de energia, acionando geralmente mecanismos hidráulicos de bombeamento de óleo que atuará no movimento de turbinas. (Paredes et al., 2008)

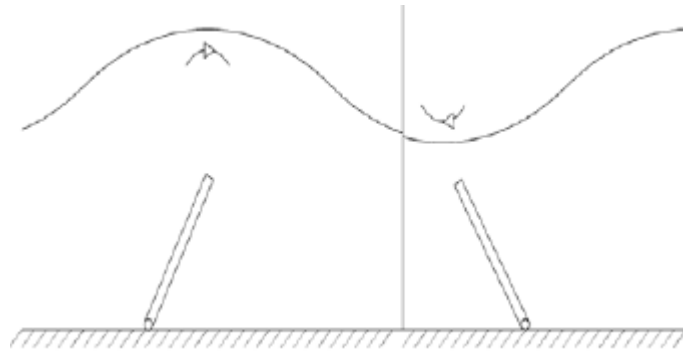


Figura 2.2 – Sistema de placa articulada no fundo. (Paredes et al., 2008)

- **Dispositivos por galgamento.**

Este tipo de sistema pode existir tanto na costa marítima como longe dela. O princípio de funcionamento aproveita o galgamento por parte da onda incidente na estrutura. O aumento da cota induz a água a escoar, atravessando uma turbina. A figura 2.3 apresenta um sistema de aproveitamento energético *offshore*, mas uma estrutura situada na linha costeira rege-se pelo mesmo princípio de funcionamento

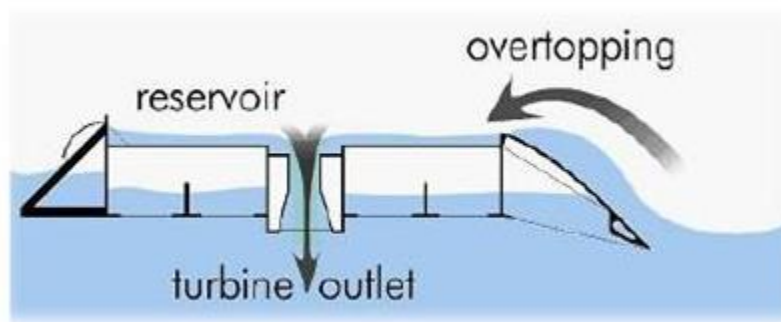


Figura 2.3 – Esquema de funcionamento de um dispositivo por galgamento *offshore*.  
(Ikionrenewableenergy, 2010)

- **Sistema de absorção pontual.**

Os sistemas de absorção pontual têm como princípio de funcionamento o movimento de um flutuador sujeito às forças provocadas pela ondulação e pelo próprio sistema de extração de energia. Estes sistemas têm uma dimensão muito inferior ao comprimento de onda e tendem a ter a capacidade de aproveitar o fenómeno de ressonância para maior oscilação. O flutuador pode ser conectado a um sistema de extração de energia, como por exemplo uma bomba hidráulica, pressurizando um fluido e transportando-o para uma turbina acoplada a um gerador elétrico.

O sistema apresentado na secção 1.2 é um sistema de absorção pontual e é com base neste que se vai desenvolver esta dissertação.

## 2.2 Teoria linear das ondas.

A opção pela teoria linear das ondas em detrimento de teorias mais precisas de ordens mais elevadas, como *Boussinesq* ou mesmo *Navier-Stokes*, justifica-se pela necessidade de descrever o escoamento apenas na vizinhança do corpo. Assim não é necessário uma teoria que descreva a propagação das ondas. Acresce ainda que o dispositivo em estudo deverá funcionar em situações de profundidade intermédia ou infinita, condições que conferem à teoria linear grande realismo.

Estando a teoria linear das ondas amplamente documentada na bibliografia, (Méhauté, 1976) opta-se aqui por apenas explicitar as expressões mais importantes e com implicações diretas neste estudo.

Admitindo que o fluido é incompressível e invíscido e que o escoamento é irrotacional existe um potencial de velocidades. Como condições de fronteira considera-se: a profundidade,  $h$ , constante; que a pressão sobre a superfície livre é invariável (e igual à atmosférica); e que a onda é periódica e propagante. O problema é linearizado para ondas de pequena amplitude configurando um problema clássico de valores de fronteira, obtendo-se para a deformada da superfície livre (Méhauté, 1976):

$$\zeta = \zeta_A \cdot \sin(\omega t - k_w x) \quad (2.1)$$

onde  $\zeta_A$  é a amplitude de onda, com frequência angular,  $\omega$ , dada por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.2)$$

$T$  é o período de onda, e  $k_w$ , o número de onda:

$$k_w = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.3)$$

onde,  $\lambda$  representa o comprimento de onda.

O problema de valores de fronteira permite também obter a (celeridade) velocidade de propagação de onda,  $C$  (Méhauté, 1976):

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \cdot \tanh(kh)} = \frac{\lambda}{T} \quad (2.4)$$

Em que  $g$  é a gravidade e  $h$  a profundidade.

Para profundidades infinitas  $\left(\frac{h}{\lambda} > 0,05\right)$ , a equação 2.4 simplifica-se (Méhauté, 1976),

$$C = \sqrt{\frac{g}{k}} = \sqrt{\frac{T \cdot g}{2 \cdot \pi}} \quad (2.5)$$

No âmbito deste trabalho interessa descrever o campo de velocidades e de pressão sobre a onda que para profundidades intermédias têm as seguintes equações (Méhauté, 1976):

$$u = \zeta_A \cdot \omega \cdot \frac{\cosh(k_w(h+z))}{\sinh(k_w \cdot h)} \cdot \sin(\omega t - k_w x) \quad (2.6)$$

$$w = \zeta_A \cdot \omega \cdot \frac{\sinh(k_w(h+z))}{\sinh(k_w \cdot h)} \cdot \cos(\omega t - k_w x) \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} p &= -\rho g z + \rho g \cdot \zeta_A \cdot \frac{\cosh(k_w \cdot (h+z))}{\cosh(k_w h)} \cdot \sin(k_w x - \omega t) = \\ &= -\rho g z + \rho g \zeta \cdot \frac{\cosh(k_w \cdot (h+z))}{\cosh(k_w h)} = -\rho g z + \rho g \cdot \zeta \cdot K_p(z) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Onde  $\rho$  representa a massa volúmica do fluido e  $K_p$ , o fator de atenuação da pressão (equação 2.9):

$$K_p(z) = \frac{\cosh(k_w \cdot (h+z))}{\cosh(k_w h)} \quad (2.9)$$

Este fator tem um valor máximo à superfície livre e mínimo no fundo. Desta forma os conversores de energia das ondas submersos que utilizem a variação de pressão como força motriz não devem ser colocados a uma profundidade exagerada pois ficam sujeitos a uma menor variação de pressão. No entanto, as equações do campo velocidades sugerem que a instalação do dispositivo a uma maior profundidade o protege das tempestades.

Para profundidades infinitas as equações 2.6, 2.7 e 2.8 podem simplificar-se (Méhauté, 1976):

$$u = \frac{2\pi}{T} \cdot \zeta_A \cdot e^{k_w \cdot z} \cdot \sin(\omega t - k_w x) \quad (2.10)$$

$$w = \frac{2\pi}{T} \cdot \zeta_A \cdot e^{k_w \cdot z} \cdot \cos(\omega t - k_w x) \quad (2.11)$$

$$p = -\rho g z + \rho g \cdot \zeta_A \cdot e^{k_w \cdot z} \cdot \sin(\omega t - k_w x) \quad (2.12)$$

A integração, durante um ciclo, das velocidades permite obter as equações das trajetórias das partículas que são linhas fechadas, elípticas para a situação de profundidade intermédia e circulares para profundidade infinita (Méhauté, 1976),

$$(x - x_0) = -\zeta_A \cdot \frac{\cosh(k_w(h+z))}{\sinh(k_w h)} \cdot \sin(k_w x - \omega t) \quad (2.13)$$

$$(z - z_0) = -\zeta_A \cdot \frac{\sinh(k_w(h+z))}{\sinh(k_w h)} \cdot \cos(k_w x - \omega t) \quad (2.14)$$

Para este trabalho é também importante conhecer o fluxo médio de energia por metro de largura de crista onda ( $F$ ) (Méhauté, 1976):

$$F = \frac{1}{128 \cdot \pi} \cdot \frac{\rho g^2 H_s^2}{f} \left[ \frac{W}{m} \right] \quad (2.15)$$

Onde  $\rho$  representa a massa volúmica,  $g$  a aceleração gravítica,  $f$  a frequência de onda e  $H_s$  a altura de onda significativa.

### 2.3 O Problema de Radiação/Difração e a Absorção de Energia

Um corpo flutuante, quando sujeito à excitação das ondas, comporta-se como um oscilador forçado.

A abordagem clássica considera o problema como linear. Pode-se então utilizar o princípio da sobreposição e decompô-lo em dois problemas diferentes mas complementares, o problema de difração e o de radiação. No problema de difração o corpo permanece imóvel sujeito à ação das ondas e no de radiação é imposto um movimento ao corpo gerando-se ondas que são radiadas pela superfície livre isenta de outras perturbações. Na figura 2.4 ilustra-se a sobreposição dos dois problemas obtendo-se o problema completo.



Figura 2.4 - Sobreposição dos problemas de difração e de radiação (Santos, 2006).

A hipótese de linearidade e consequente sobreposição de efeitos é também útil para compreender o funcionamento de um dispositivo de absorção pontual. Este dispositivo necessita de se mover para produzir energia, consequente tem de gerar ondas radiantes. A ação ideal do dispositivo no campo de ondas é ilustrada na figura 2.5.

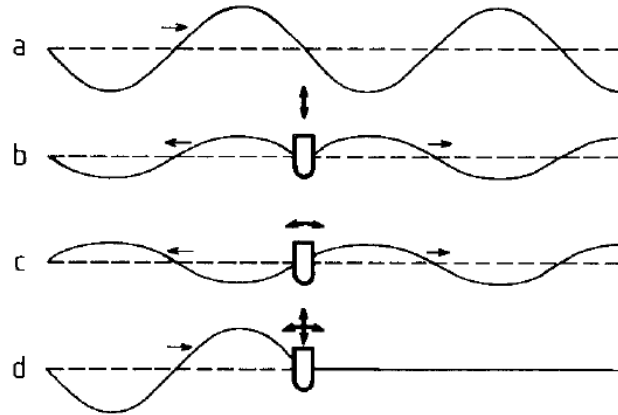


Figura 2.5 – *a*. Onda não perturbada; *b*. Ondas (simétricas) radiadas pelos corpos flutuantes oscilando verticalmente (em água calma); *c*. Ondas (antissimétricas) geradas pelos corpos flutuantes oscilando horizontalmente (em água calma); *d*. Sobreposição (soma) das três ondas acima e consequente absorção completa da energia da onda incidente (Falnes, 2002).

Os movimentos verticais e horizontais (curvas *b* e *c*) devem gerar uma onda com metade da amplitude da onda incidente (curva *a*). Escolhendo as fases de forma conveniente consegue-se deixar a onda incidente inalterada e absorver por completo a onda transmitida. Assim, as ondas radiadas (para o lado esquerdo) pelos dois modos de oscilação têm de estar em oposição de fase para que se anulem, não tendo assim nenhum efeito sobre a agitação incidente. Além disso no sentido oposto, estas ondas têm de estar na mesma fase, para que a sua soma anule a agitação.

Este cancelamento ou redução das ondas deve ser realizado pelo dispositivo através da imposição de uma lei de deslocamento apropriada, que lhe permite absorver a energia incidente.

De acordo com o exposto, se o dispositivo tiver apenas um grau de liberdade (o vertical ou o horizontal) apenas poderá extrair metade da energia incidente, ainda que movimentando-se de forma ótima. Este facto deve-se a que metade da energia incidente é radiada pelo dispositivo. Nesta situação, a onda radiada para a esquerda e a onda transmitida têm a mesma amplitude, que é metade da amplitude da onda incidente. Assim, de acordo com a equação 2.15, a energia da onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude, tal facto significa que 25% da energia incidente é radiada para a esquerda, e também 25% é transmitida para a direita. Os restantes 50% podem ser absorvidos pelo sistema de absorção de energia.



## 2.4 Modelação matemática de um corpo flutuante.

No âmbito deste trabalho, pretende-se construir um modelo que permita descrever o movimento do corpo flutuante excitado por uma onda e ligado a um dispositivo de extração de energia. Para isto apresenta-se inicialmente o modelo clássico de um corpo flutuante livre.

Uma estrutura a flutuar livremente no oceano possui, relativamente a um referencial fixo, seis graus de liberdade: três de translação e três de rotação, como exemplificado na figura 2.6.

- Avanço: Translação ao longo de  $X$ . (numa embarcação sem simetria em torno de  $Z$  é o eixo proa/popa)
- Deriva: Translação ao longo de  $Y$ .
- Arfagem: Translação ao longo de  $Z$ .
- Balanço: Rotação em torno de  $X$ .
- Cabeceio: Rotação em torno de  $Y$ .
- Guinada: Rotação em torno de  $Z$ .

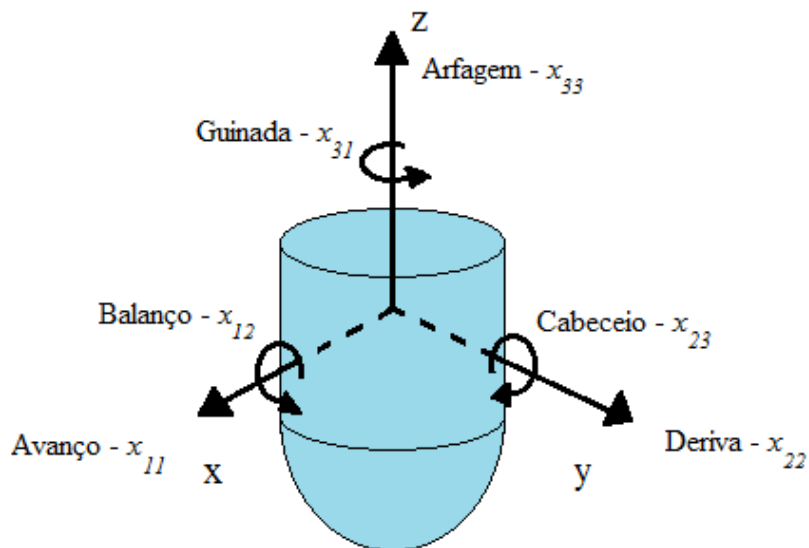


Figura 2.6 – Os seis graus de um flutuador em movimento livre.

Um flutuador, normalmente apresenta estes 6 movimentos, mas restrições no movimento do próprio corpo, como amarrações, podem diminuir o número de graus de liberdade. Na presente dissertação, vai ser apenas estudado o movimento de arfagem para extração de energia, reduzindo assim para 1 o número de graus de liberdade.

### 2.4.1 Equação de Laplace e Condições de fronteira

Nas hipóteses da teoria linear das ondas, aplicando o princípio da conservação da massa conclui-se que o potencial de velocidades tem de satisfazer a equação de *Laplace*:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.16)$$

Na superfície livre e superfície do corpo têm de ser respeitadas duas condições de fronteira, uma de carácter dinâmico e outra cinemática. São de seguida apresentadas estes dois tipos de condição fronteira:

#### ▪ Condições fronteira cinemáticas

Uma partícula de fluido não poderá atravessar a fronteira de um corpo impermeável. Por outras palavras, a componente normal da velocidade de uma partícula de fluido numa superfície sólida sem movimento, deve ser igual a zero. Por exemplo no fundo do mar, esta condição deve ser satisfeita para  $z = -h$ , sendo  $h$  a profundidade do mar:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad , \text{ no fundo do mar } (z = -h) \quad (2.17)$$

Onde  $n$  representa o vetor normal externo à superfície do corpo em qualquer ponto considerado. Para um corpo em movimento, com uma componente normal de velocidade  $v_n$  num qualquer ponto da sua superfície a condição fronteira é também de impermeabilidade:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = v_n \quad , \text{ na superfície do corpo } \quad (2.18)$$

A condição fronteira cinemática na superfície livre expressa que uma partícula de fluido a repousar inicialmente na superfície livre, permanecerá nessa superfície livre. Isto significa que  $z - \zeta(x,y,z)$  deve ser constante na superfície livre, para qualquer instante de tempo (sendo  $\zeta(x,y,z)$  a posição da superfície livre), resultando assim na seguinte condição fronteira cinemática linearizada:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad , \text{ na superfície livre } \quad (2.19)$$

### ▪ Condição fronteira dinâmica

A condição dinâmica resulta do facto de a superfície livre não suportar diferenças de pressão. Isso pode ser expresso por:

$$\frac{Dp}{Dt} = 0 \quad , \text{ na superfície livre} \quad (2.20)$$

Sendo o operador  $\frac{D}{Dt}$  representativo da derivada total:  $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z}$ .

Tendo em conta esta condição e a condição cinemática da superfície livre (equação 2.19), determina-se a condição fronteira total linearizada para a superfície livre:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad , \text{ para } z=0 \quad (2.21)$$

## 2.4.2 Decomposição do potencial e problemas de radiação e difração.

Assumindo que todos os fenómenos são lineares, o potencial de velocidade total  $\phi$  pode ser indicado como na equação 2.22.

$$\phi(t; x, y, z) = \phi_0 + \phi_{rad} + \phi_D \quad (2.22)$$

Onde  $\phi_0$  é o potencial incidente,  $\phi_D$  é o potencial de perturbação ao potencial incidente considerando o corpo imóvel e  $\phi_{rad}$  é o potencial de radiação. Esses potenciais serão explicados nos seguintes pontos.

### ▪ Potencial de radiação

Consideremos que o corpo possui um movimento harmónico num fluido em repouso. Devido a este movimento, algumas ondas são radiadas. Essa radiação de ondas é descrito pelo potencial de radiação, indicado por  $\phi_{rad}$  e pode ser expresso por:

$$\phi_{rad} = \sum_{i=1}^6 \phi_i^{(R)} \quad (2.23)$$

$\phi_i^{(R)}$  representa o potencial de radiação, por unidade de velocidade no modo  $i$ . O potencial de radiação deve satisfazer a equação de *Laplace* (equação 2.16) e as condições fronteira na superfície livre

(equação 2.21), na superfície do corpo (equação 2.18) e no fundo do mar (equação 2.17). Existe também uma condição que surge durante a transformação do domínio temporal para o domínio de frequências. Essa condição indica que à medida que o raio de propagação da onda aumenta para o infinito, o potencial de radiação tende para zero. Ou seja, a condição fonteira no infinito:

$$\nabla\phi \rightarrow 0 \quad \text{quando} \quad r \rightarrow 0 \quad , \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left( \frac{\partial\phi}{\partial r} - ik_w\phi \right) = 0 \quad , \quad (2.24)$$

#### ▪ Potencial de difração

O problema da difração é descrito através do potencial de difração, indicado por  $\phi_D$ . O potencial da onda incidente  $\phi_0$  é conhecido através da teoria linear das ondas.

Similarmente ao potencial de radiação, este deve respeitar a equação de *Laplace* (equação 2.16), condição do fundo (equação 2.17) e a condição da superfície livre (equação 2.21). Além disso, a soma do potencial da onda incidente  $\phi_0$  e de difração  $\phi_D$  deve satisfazer uma nova condição fronteira do corpo:

$\partial(\phi_0 + \phi_D)/\partial n = 0$  na superfície do corpo ( $S_b$ ). Isto resulta em:

$$\frac{\partial\phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial\phi_0}{\partial n} \quad , \quad \text{em } S_b \quad (2.25)$$

A única diferença em relação ao potencial de radiação é precisamente esta condição fronteira no corpo.

### 2.4.3 Pressões e forças

Como já visto na secção 2.4.2, assumindo que todos os fenómenos são lineares, o potencial total  $\phi$  pode ser indicado como na equação 2.22.

$$\phi = \phi_0 + \phi_{rad} + \phi_D \quad (2.22)$$

A pressão é então obtida usando a equação de *Bernoulli*, com  $p_0 = p_{atm} = 0$ .

$$p = -\rho \frac{\partial\phi}{\partial t} - \rho g z \quad (2.26)$$

$$= -\rho \frac{\partial}{\partial t} (\sum_{i=1}^6 \phi_{rad} + \phi_0 + \phi_D) - \rho g z$$

As equações das forças são obtidos por integração do campo de pressões na superfície em questão.

Do primeiro termo da equação 2.26 ( $\phi_{rad}$ ) obtém-se a força de radiação, indicada por  $F_{rad}$ . Esta é constituída por uma parte em fase com a aceleração e outra em fase com a velocidade:

$$F_{rad,j} = \sum_{i=1}^6 -m_{aji} \frac{d^2 \xi_i}{dt^2} - b_{hid\ ji} \frac{d \xi_i}{dt} \quad (2.27)$$

Em que  $\xi_i$  representa o vetor de deslocamentos ou rotações do corpo no modo  $i$ .

$m_{aji}$  é a “massa adicionada”, este coeficiente representa uma massa equivalente de fluido que tem a aceleração do corpo. A interpretação física deste termo tem a ver com a força adicional necessária para acelerar essa massa de fluido conjuntamente com o corpo, que deste modo comporta-se como se tivesse uma massa adicionada.

$b_{hid\ ji}$  é o “coeficiente de amortecimento hidrodinâmico”, este coeficiente encontra-se em fase com a velocidade e está relacionado com a energia dissipada na geração e radiação de ondas devido ao corpo se encontrar a oscilar junto da superfície livre. Na prática, o potencial de radiação é determinado resolvendo o problema de condições fronteira, discretizando em painéis a superfície molhada e determinando a distribuição de densidade de singularidades que verificam a equação de Laplace (equação 2.16), superfície livre (equação 2.21), superfície do corpo (equação 2.18) e fundo do mar (equação 2.17).

Os índices  $ji$  indicam que as forças atuam na direção  $j$  e são induzidas por oscilações na direção  $i$ .

A integração do segundo termo da equação 2.26 que contém o potencial de onda incidente, resulta na chamada força de *Fraude-Krylov*. O potencial  $\phi_0$  é conhecido da teoria linear das ondas. Esta força é determinada assumindo que o corpo não perturba a onda incidente. Corresponde assim à ação isolada da onda não perturbada sobre a parte molhada da estrutura.

A integração do terceiro termo, com o potencial de difração, resulta na força de difração. Esta força resulta da perturbação ao potencial da onda incidente. A soma da força de *Fraude-Krylov* com a força de difração é a chamada força de excitação, representada do  $F_{ex}$ .

A integração do último termo resulta da combinação entre a força gravítica e a força hidrostática do flutuador, resultando na força de restituição  $F_{res}$ .

Quando todas as forças a atuarem na estrutura flutuante são conhecidas, o movimento desta é traduzido na equação que em notação matricial se escreve:

$$\sum_{i=1}^6 [(m_{ji} + m_{aji}) \frac{d^2 \xi_i}{dt^2} + b_{hid\ ji} \frac{d \xi_i}{dt} + k_{ji} \xi_i] = F_{ex}(t) \quad (2.28)$$

$m_{ji}$  representa os elementos da linha  $j$  e coluna  $i$  da matriz de massa do flutuador (equação 2.29),  $m$  é a massa do flutuador. O plano  $xy$  corresponde ao plano coincidente com a linha de água.  $Z_g$  é a distância do centro de gravidade (para baixo), a partir da linha de água.

$$m_{ji} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & 0 \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -mz_g & 0 & I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ mz_g & 0 & 0 & I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$m_{aji}$  representa os elementos da linha  $j$  e coluna  $i$  da matriz de massa adicionada (equação 2.30),  $m_{a11} = m_{a22}$ ,  $m_{a44} = m_{a55}$  e  $m_{a24} = m_{a42} = -m_{a15} = -m_{a51}$ . Para um corpo com eixo de simetria vertical, os movimentos de guinada não necessitam de ser caracterizados.

$$m_{aji} = \begin{bmatrix} m_{a11} & 0 & 0 & 0 & m_{a15} & 0 \\ 0 & m_{a22} & 0 & m_{a24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{a33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{a42} & 0 & m_{a44} & 0 & 0 \\ m_{a51} & 0 & 0 & 0 & m_{a55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$b_{hid\ ji}$  representa os elementos da linha  $j$  e coluna  $i$  da matriz de amortecimento hidrodinâmico (equação 2.31). Esta matriz tem que os mesmos coeficientes não nulos da matriz de massa adicionada.

$$b_{hid\ ji} = \begin{bmatrix} b_{hid\ 11} & 0 & 0 & 0 & b_{hid\ 15} & 0 \\ 0 & b_{hid\ 22} & 0 & b_{hid\ 24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{hid\ 33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{hid\ 42} & 0 & b_{hid\ 44} & 0 & 0 \\ b_{hid\ 51} & 0 & 0 & 0 & b_{hid\ 55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$k_{ji}$  representa os elementos da linha  $j$  e coluna  $i$  da matriz de coeficientes da força de restituição (equação 2.32).  $k_{33} = \rho g A_w$ ,  $k_{44} = \rho g S_{22} + \rho g V_D (z_B - z_G)$ . Onde  $\rho$  representa a massa volúmica da água,  $g$  é a aceleração gravítica,  $S_{22}$  é o momento de inércia da superfície resultante do corte plano da superfície livre relativamente a  $xx$ .  $V_D$  é o volume deslocado,  $z_B$  é a coordenada do centro de impulsão,  $z_G$  é a coordenada do centro de gravidade e  $A_w$  é área do flutuador na linha de água no equilíbrio hidrostático.

$$k_{ji} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{55} = k_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$F_{ex}$  representa os elementos da linha  $j$  e coluna  $i$  da matriz da força de excitação.

$$F_{ex} = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z] \quad (2.33)$$

A equação 2.26 contém um somatório de equações diferenciais. No entanto, quando um corpo é restringido a um grau de liberdade (por exemplo, movimento de arfagem), só uma equação diferencial resta. Nesta dissertação, unicamente o modo de arfagem vai ser analisado, deixando de ser necessário o uso dos índices  $j$  e  $i$ . Sendo assim, a seguinte notação vai ser modificada a partir deste ponto:

$$\begin{aligned} m_{ji} &= m_{33} = m \\ m_{aji} &= m_{a33} = m_a \\ b_{hid \ ji} &= b_{hid \ 33} = b_{hid} \\ k_{ji} &= k_{33} = k \\ F_{ex \ j} &= F_{ex \ 3} = F_{ex} \\ v_3 &= v \end{aligned}$$

Particularizando para o movimento de arfagem, a equação 2.28 torna-se em:

$$(m + m_a) \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + b_{hid} \frac{dz(t)}{dt} + kz(t) = F_{ex}(t) \quad (2.34)$$

Tem particular interesse efetuar a transformação para o domínio de frequências. Assumindo que as funções são lineares e harmónicas, podemos escrever a posição e a força de excitação da seguinte forma:

$$F_{ex}(t) = F_{ex} \cos(\omega t + \beta_F) = \text{Re}[F_{ex} e^{i\omega t}] \quad (2.35)$$

$$z(t) = z \cos(\omega t + \beta_z) = \text{Re}[z e^{i\omega t}] \quad (2.36)$$

$F_{ex}$  representa a amplitude da força,  $\omega$  a frequência angular,  $\beta_F$  o ângulo de fase da força,  $z$  é a amplitude da posição no modo de arfagem e  $\beta_z$  o ângulo de fase da posição no modo de arfagem.

Assim, o movimento do flutuador vai ser descrito, depois de efetuada a transformação para o domínio das frequências, por:

$$[-\omega^2(m + m_a) + j\omega(b_{hid}) + k]z = F_{ex} \quad (2.37)$$

Esta equação no domínio de frequências é muito mais prática para análise. No programa AQWA, são calculados os coeficientes  $b_{hid}$  e  $m_a$  que variam com a frequência.

De uma forma mais simples, o sistema pode ser representado através das suas características elásticas, de amortecimento e da sua massa efetiva, como o apresentado na figura 2.7.

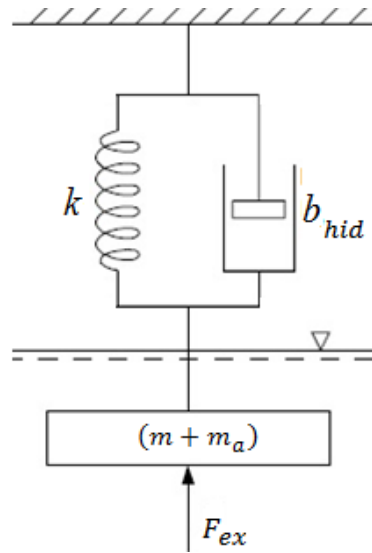


Figura 2.7 – Representação simplificada do sistema (flutuador livre).

A componente de restituição  $k$  funciona como uma mola, contrariando o movimento do flutuador. O amortecimento  $b_{hid}$  também contraria o movimento, mas a força exercida varia com a velocidade. A massa do flutuador  $m$  e a massa adicionada  $m_a$  correspondem à componente inercial do sistema. A onda incidente excita o flutuador exercendo neste uma força  $F_{ex}$ .

Na análise de frequências, o *RAO* (*Response Amplitude Operator*, equação 2.38) representa a relação entre a resposta do flutuador e a onda incidente, indicada na equação 2.38

$$RAO = \frac{z_A}{\zeta_A} \quad (2.38)$$



Na figura 2.8 são apresentadas três zonas diferentes da amplitude de resposta  $RAO$  para várias frequências.

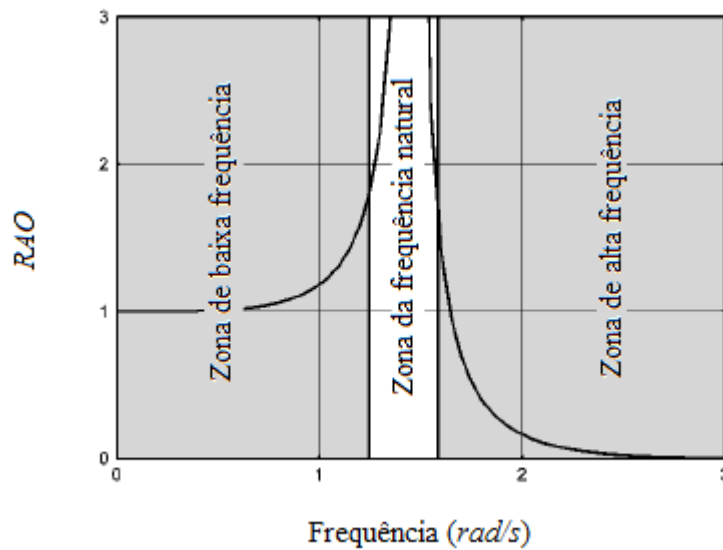


Figura 2.8 – Diferentes zonas de frequência da amplitude de resposta ( $RAO$ ) para um flutuador genérico no modo de arfagem. (Journée e Massie, 2001)

Três áreas distintas podem ser observadas no que respeita ao movimento do flutuador no modo de arfagem, nomeadamente:

- Zona de baixa frequência – à medida que a frequência se aproxima de zero, o valor de  $RAO$  tende para a unidade, ou seja, o flutuador acompanha a onda.
- Zona da frequência natural - o valor de  $RAO$  aumenta muito à medida que se aproxima da frequência natural, sendo a amplitude do flutuador muito maior que o da onda incidente.
- Zona de alta frequência – à medida que a frequência aumenta, o valor de  $RAO$  tende para zero, ou seja, o flutuador não acompanha a onda, e no limite não se move.

De forma a aproveitar o máximo das capacidades do flutuador para extração de energia, será necessário aumentar a sua amplitude de resposta. Assim, a frequência da onda incidente deverá ser próxima da frequência natural da estrutura (fenómeno de ressonância) fazendo com que as amplitudes de movimento do flutuador sejam maiores.

## 2.5 Ondas irregulares

Nesta secção serão utilizados os conceitos espectrais na caracterização de um estado de mar irregular.

O espectro de resposta do movimento de um flutuador pode ser calculado através da função de transferência do movimento (*RAO*) e do espectro de energia que caracteriza o estado do mar (Journée e Massie,2001):

$$S_z(\omega) \cdot d\omega = \left| \frac{z_A}{\zeta_A}(\omega) \right|^2 \cdot S_\zeta(\omega) \cdot d\omega \quad (2.39)$$

Em que  $S_z(\omega) \cdot d\omega$  representa o espectro da resposta do flutuador no modo de arfagem,  $z_A$  é a amplitude do movimento de arfagem,  $\zeta_A$  é o deslocamento vertical da superfície livre e  $S_\zeta(\omega) \cdot d\omega$  representa um espectro de energia de ondas irregulares.

A figura 2.9 representa a transformação espectral da deformação da superfície livre na resposta do flutuador.

Para cada componente harmónica de onda irregular é associado um movimento do flutuador por multiplicação da função de transferência  $\frac{z_A}{\zeta_A}$  (*RAO*). O resultado é representado no lado direito da figura 2.9. Utilizando o princípio da sobreposição, o movimento do flutuador  $z(t)$  é obtido somando os componentes da resposta relativos a cada onda regular. (Journée e Massie,2001)

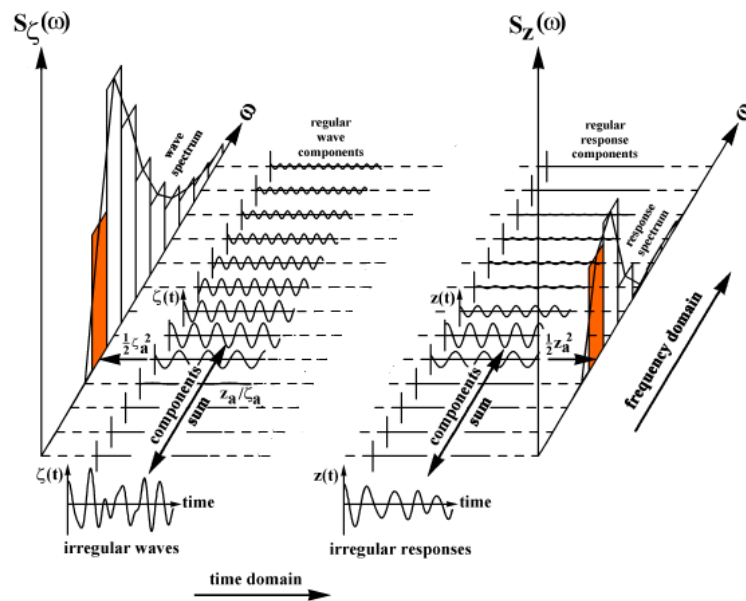


Figura 2.9 – Princípio da transferência de ondas irregulares para respostas (Journée e Massie,2001).

No programa *AQWA*, depois de calculada a função transferência (*RAO*), no domínio da frequência e inseridas as características do espectro de excitação, ( $S_z(\omega)$ ) baseado em dados reais, este calcula a resposta total do flutuador no modo de arfagem. A saída do programa permite obter as informações no domínio do tempo, necessárias ao estudo do flutuador.

## 2.6 Características de um sistema PTO no movimento de arfagem.

Nas secções anteriores foram descritas as equações de movimento para um flutuador com movimento livre. No entanto, a extração de energia é unicamente possível através de um sistema de conversão apropriado, a que é denominado por sistema *PTO* (*Power Take-off*).

A representação simplificada deste sistema é apresentada na figura 2.10. Aqui, para além das componentes já apresentadas (caracterizadas pelos: coeficiente de amortecimento hidrodinâmico  $b_{hid}$ , força de restituição  $k$  e massa adicionada  $m_a$ ), são também representadas a características do sistema *PTO*. Este sistema é modelado através de uma componente dissipativa em fase com a velocidade (coeficiente de amortecimento do sistema *PTO*,  $b_{PTO}$ ) e a uma componente elástica em fase com o deslocamento (coeficiente elástico do sistema *PTO*,  $k_{PTO}$ ).

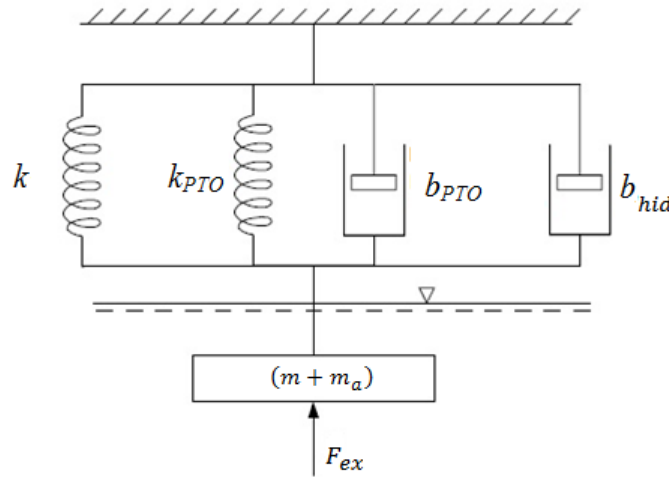


Figura 2.10 – Flutuador com sistema *PTO* (simplificação do sistema).

A força que atua no sistema *PTO* é a soma das suas componentes elásticas e dissipativas (equação 2.40), onde  $\dot{z}$  representa a velocidade no modo de arfagem:

$$F_{PTO} = -b_{PTO} \cdot \dot{z} - k_{PTO} z \quad (2.40)$$

A equação de movimento (equação 2.37) no modo de arfagem pode ser alterada de maneira a incluir o sistema *PTO* :

$$\begin{aligned} [-\omega^2(m + m_a) + j\omega(b_{hid}) + k]z &= F_{ex} + F_{PTO} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow [-\omega^2(m + m_a) + j\omega(b_{hid} + b_{PTO}) + (k + k_{PTO})]z &= F_{ex} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow z &= \frac{F_{ex}}{[j\omega(b_{hid} + b_{PTO}) - \omega^2(m + m_a) + (k + k_{PTO})]} \end{aligned} \quad (2.41)$$

A equação do movimento é função da frequência e depende dos coeficientes do flutuador assim como das características do sistema *PTO*. Pode-se ainda derivar a equação do movimento de modo a obter a velocidade de arfagem  $\dot{z}$  (equação 2.42):

$$\dot{z} = \frac{F_{ex}}{\left[ (b_{hid} + b_{PTO}) + j\left[ \omega(m + m_a) - \frac{k + k_{PTO}}{\omega} \right] \right]} \quad (2.42)$$

### 2.6.1 Potência absorvida e condições ótimas do sistema *PTO*

Nesta secção serão apresentadas as equações de potência, assim como as características ideais do *PTO* para a otimização da potência absorvida.

Calcula-se a potência de excitação  $P_{ex}$  através do produto da força pela velocidade (Falnes, 2002):

$$P_{ex}(t) = F_{ex}(t) \cdot \dot{z}(t) \quad (2.43)$$

Demonstra-se (Falnes, 2002) que a potência de excitação resulta na equação 2.44:

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \cdot |F_{ex}| \cdot |\dot{z}| \cdot \cos(\varphi_j) \quad (2.44)$$

Onde  $\varphi_j = \varphi_u - \varphi_F$ .

$\varphi_u$  representa a fase da velocidade e  $\varphi_F$  a fase da força de excitação. A potência de radiação,  $P_{rad}$ , obtém-se a partir do coeficiente de amortecimento ( $b_{hid}$ ), (Falnes, 2002):

$$P_{rad} = \frac{1}{2} \cdot b_{hid} \cdot |\dot{z}|^2 \quad (2.45)$$

A conservação de energia implica que a potência absorvida,  $P_{abs}$ , seja igual à diferença entre a potência de excitação e a radiada.

$$\begin{aligned} P_{abs} &= P_{ex} - P_{rad} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_{abs} &= \frac{1}{2} \cdot |F_{ex}| \cdot |\dot{z}| \cdot \cos(\varphi_j) - \frac{1}{2} \cdot b_{hid} \cdot |\dot{z}|^2 \end{aligned} \quad (2.46)$$

Por ser uma equação parabólica, a potência absorvida tem um ponto máximo. Esse ponto indica (Falnes, 2002) que a potência máxima que é possível extrair equivale a 50 % da potência de excitação (como já se tinha contatado na secção 2.3) e é igual à potência radiada.

Por a potência absorvida ser igual à potência radiada, resulta que idealmente deve-se ter:

$$b_{PTO} = b_{hid} \quad (2.47)$$

Em que ( $b_{PTO}$ ) representa o coeficiente dissipativo do *PTO* e ( $b_{hid}$ ) o coeficiente dissipativo do flutuador. Assim, a potência absorvida resulta em:

$$P_{rad} = P_{abs} = \frac{1}{2} b_{PTO} |\dot{z}|^2 \quad (2.48)$$

A potência absorvida pode então ser determinada, substituindo a velocidade de arfagem (equação 2.42) na equação 2.48:

$$\begin{aligned} P_{abs} &= \frac{1}{2} b_{PTO} \cdot \left| \frac{F_{ex}}{[(b_{hid} + b_{PTO}) - j\omega(m + m_a) + (j\frac{k + k_{PTO}}{\omega})]} \right|^2 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_{abs} &= \frac{1}{2} \frac{b_{PTO} \cdot F_{ex}^2}{(b_{hid} + b_{PTO})^2 + (\omega m + \omega m_a - \frac{k + k_{PTO}}{\omega})^2} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Fazendo a componente imaginária da equação 2.49 igual a zero, o sistema estará em ressonância (velocidade em fase com a força de excitação), ou seja:

$$\omega(m + m_a) - \frac{k + k_{PTO}}{\omega} = 0 \quad (2.50)$$

Onde  $\omega$  representa a freqüência angular,  $m$  a massa do flutuador,  $m_a$  o coeficiente de massa adicionada,  $k$  o coeficiente de restituição e  $k_{PTO}$  o coeficiente elástico do sistema *PTO*.

Sendo possível alterar a componente elástica do sistema *PTO*, é possível escolher o coeficiente  $k_{PTO}$  que fará o sistema entrar em ressonância, ou seja:

$$k_{PTO} = \omega^2(m + m_a) - k \quad (2.51)$$

A equação da potência absorvida (2.50) será então transformada na equação 2.52:

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \frac{b_{PTO} \cdot F_{ex}^2}{(b_{hid} + b_{PTO})^2} \quad (2.52)$$

Maximizando a equação 2.52 (Falnes, 2002) chega-se à conclusão que fazendo  $b_{hid} = b_{PTO}$  atinge-se a potência absorvida máxima, ou seja:

$$P_{abs,max} = \frac{F_{ex}^2}{8 b_{PTO}} \quad (2.53)$$

Em conclusão, as condições ideais do sistema *PTO* para maximização da potência absorvida serão:

$$Coeficientes \acute{o}timos \text{ do } PTO = \begin{cases} k_{PTO} = \omega^2(m + m_a) - k \\ b_{PTO} = b_{hid} \end{cases} \quad (2.54)$$

Assim, com os coeficientes calculados no programa *AQWA* tem-se a possibilidade de calcular as características de *PTO* ótimas que maximizam a potência absorvida.

### 3. Código numérico *AQWA*.

O programa *AQWA* é uma ferramenta relativamente recente e ainda em desenvolvimento. Este tem, apesar do seu potencial, baixos níveis de utilização quando comparado com outros programas existentes, nomeadamente o *WAMIT* e essencialmente no domínio da extração de energia das ondas.

Neste capítulo, é fornecida uma breve descrição dos métodos de funcionamento desta ferramenta numérica. Na figura 3.1 é descrita a ordem de procedimentos usados no *AQWA* para a descrição do movimento de um corpo flutuante. Inicialmente é necessário inserir os dados de entrada (a ser descritos na secção 3.1). O programa é dividido em duas partes, *Hydrodynamic Diffraction* e *Hydrodynamic Time Response*. No primeiro, o programa recebe os dados de entrada e calcula os coeficientes hidrodinâmicos no domínio das frequências. No segundo, o programa recebe os coeficientes e calculando o movimento do corpo sujeito à excitação regular ou irregular. Seguidamente é efetuada a transformação para o domínio do tempo e construída a resposta do flutuador.

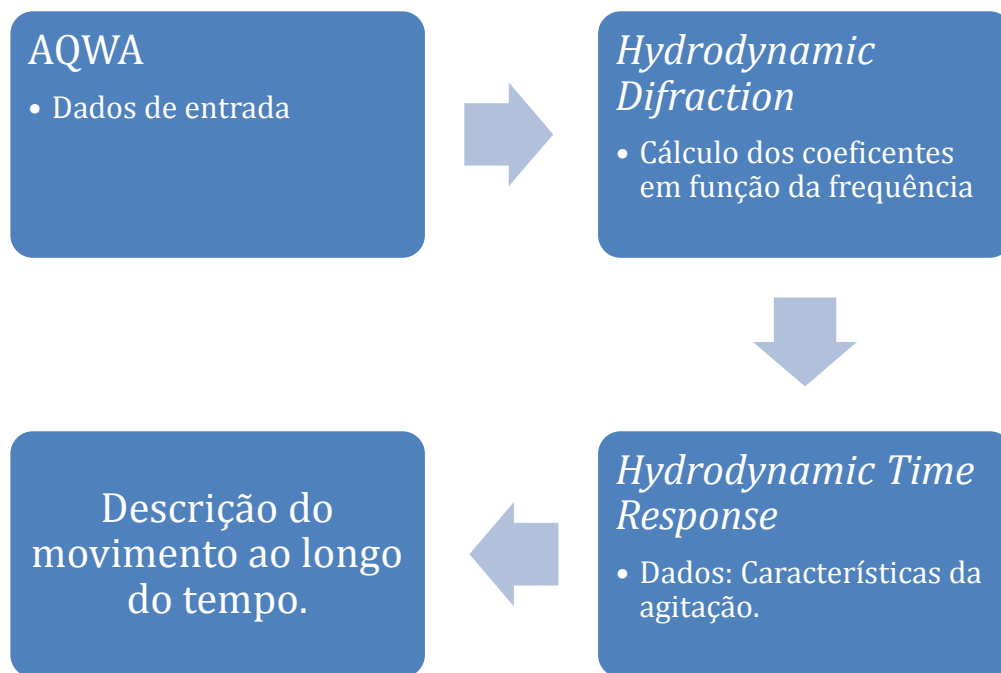


Figura 3.1 - Ordem de procedimentos usados no *AQWA*

### 3.1 Hydrodynamic Diffraction

O programa AQWA calcula os coeficientes estudados no capítulo 2, no domínio das frequências na componente do programa com o nome de *Hydrodynamic Diffraction*.

A figura 3.2 esquematiza a ordem de procedimentos para o cálculo dos coeficientes. Antes de dar início à simulação é necessária a preparação dos dados de entrada. Esses dados envolvem as características tanto geométricas como de massa do flutuador, a descrição da malha a gerar nomeadamente: o número de painéis, as características da agitação, a profundidade, a gama de frequências e a direção das ondas.

Depois de introduzidos os dados de entrada, o programa determina a densidade de singularidades nos painéis, constrói a função potencial e o campo de velocidades e posteriormente o campo de pressões. São fornecidos assim os coeficientes que descrevem as forças aplicadas no flutuador e o movimento de resposta para uma onda unitária (*RAO*).

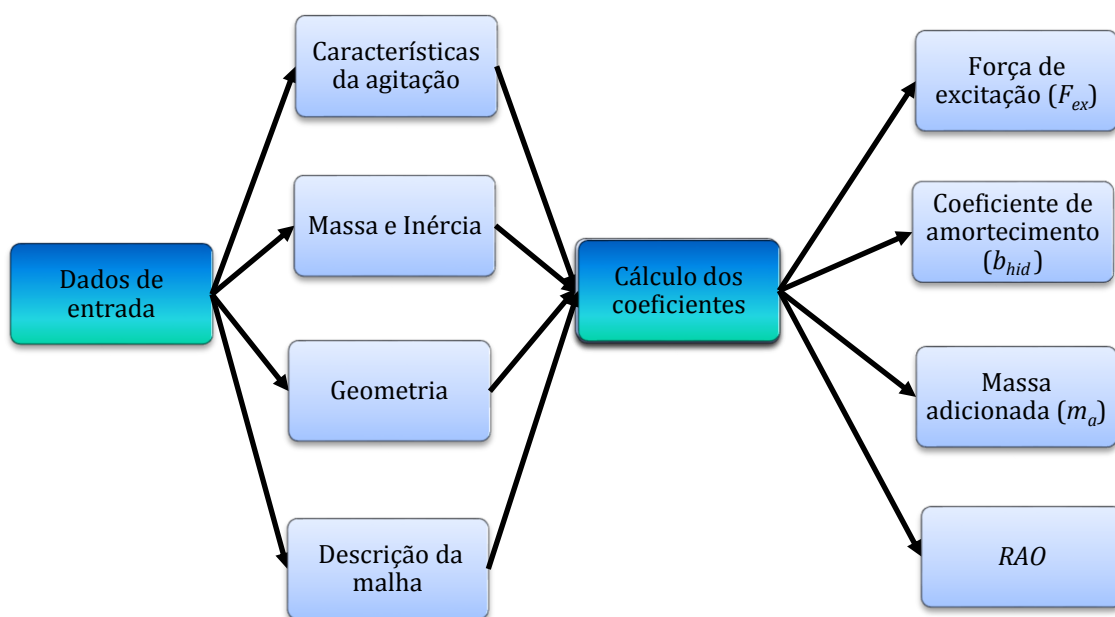


Figura 3.2 - Procedimentos para o cálculo dos coeficientes no domínio das frequências.



### 3.2 *Hydrodynamic Time Response.*

À componente *Hydrodynamic Time Response* do programa AQWA cabe a transformação do domínio das frequências para o domínio temporal, na figura 3.3 são expressos os procedimentos para a descrição do movimento no domínio do tempo.

Para esta transformação é necessário que tenham sido calculados os coeficientes hidrodinâmicos no domínio das frequências. Depois de receber esta informação é também necessário inserir as características da agitação, como a frequência e amplitude no caso de ser regular, ou as características espectrais, no caso de ser irregular. Com esses dados, o programa faz a transformação para o domínio do tempo, descrevendo o movimento e derivando-o para o cálculo da velocidade.

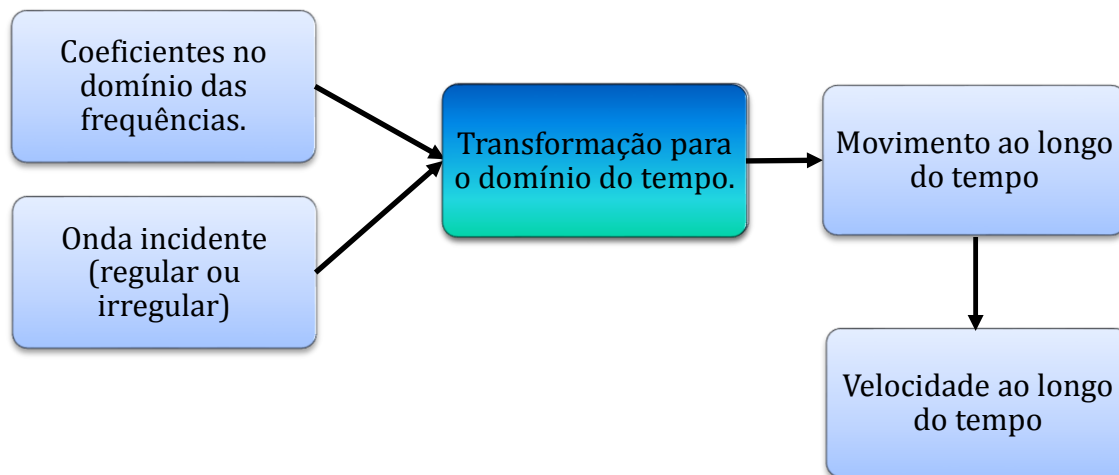


Figura 3.3 – Estrutura do componente *Hydrodynamic Time Response*.

### 3.3 Tratamento de dados.

Depois de obtidos os resultados da análise dos coeficientes no domínio das frequências e a descrição do movimento no tempo, o tratamento de dados (figura 3.4) foi efetuado utilizando o *Excel* de forma a tratar os resultados. Se necessário procede-se à adimensionalização dos coeficientes ou outros cálculos necessários. Depois de tratados os dados, estes são transferidos para o programa *Grapher* para a representação gráfica necessária à análise dos resultados.

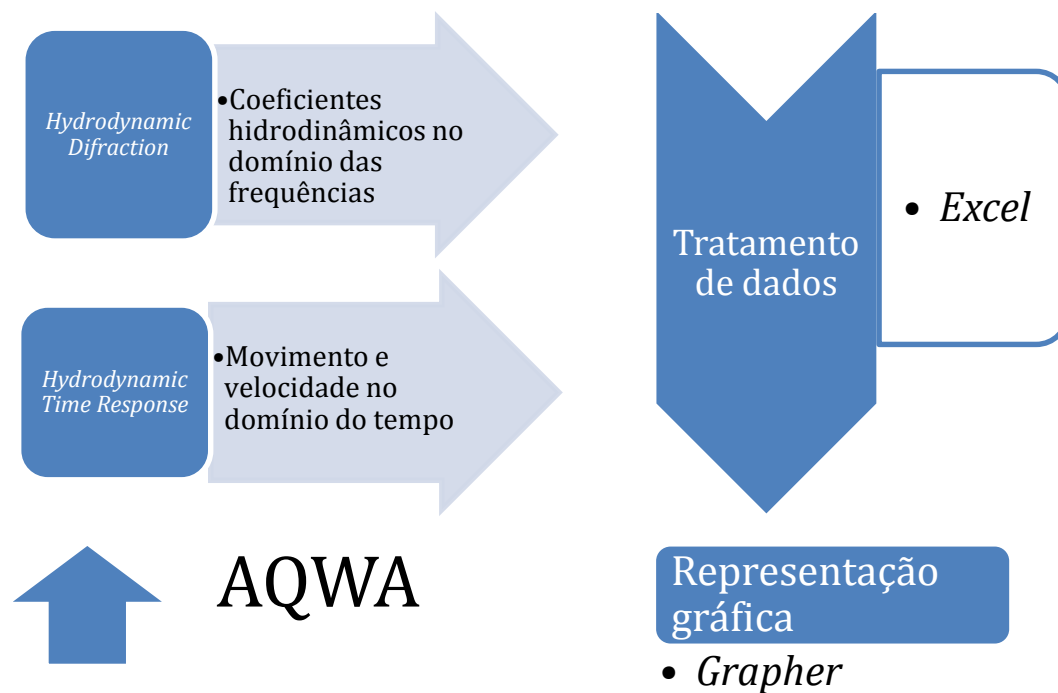


Figura 3.4 – Fluxograma: simulação – tratamento – apresentação de resultados

▪ Análise espectral.

No decorrer desta dissertação foi ainda criado um programa em *Matlab* para a reprodução de espectros de resposta. Houve a necessidade de construir uma rotina no *Matlab* que usa o algoritmo *FFT* (*Fast Fourier Transform*) o qual, para uma série temporal executa a transformada de *Fourier* discreta no domínio das frequências.

Na tabela 3.1 é explicitada a rotina desenvolvida para a análise espectral:

Tabela 3.1 – Rotina para cálculo da FFT.

<i>F<sub>s</sub></i> =10;	% frequência de aquisição
<i>L</i> =10001;	% números de pontos na análise temporal
<i>NFFT</i> = 8192;	% número de frequências a analisar (2 <sup>13</sup> )
<i>Y</i> = fft( <i>x</i> , <i>NFFT</i> )/ <i>L</i> ;	% execução do algoritmo FFT
<i>f</i> = <i>F<sub>s</sub></i> /2* <i>linspace</i> (0,1, <i>NFFT</i> /2+1);	% vetor frequência
<i>Y1</i> =2* <i>abs</i> ( <i>Y</i> (1: <i>NFFT</i> /2+1));	% magnitude do espectro.
<i>plot</i> ( <i>f</i> , <i>Y1</i> )	% reprodução gráfica
<i>fileID</i> = <i>fopen</i> ('FREQ.txt','w');	% Escreve um ficheiro com as frequências.
<i>fprintf</i> ( <i>fileID</i> , '%f\r\n', <i>f</i> );	
<i>fclose</i> ( <i>fileID</i> );	
<i>fileID</i> = <i>fopen</i> ('FFT.txt','w');	% Escreve um ficheiro com as FFT.
<i>fprintf</i> ( <i>fileID</i> , '%f\r\n', <i>Y1</i> );	
<i>fclose</i> ( <i>fileID</i> );	

Para a execução desta rotina, importa-se para o programa *Matlab* uma série temporal (vector *x* na rotina, linha 3) onde se discretiza a posição do flutuador calculados com o programa AQWA.



## 4. Testes de validação de procedimentos.

Neste capítulo, compararam-se os resultados obtidos no *AQWA* com resultados retirados da bibliografia em que se utiliza o programa *WAMIT* para o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos. Inicialmente vão ser validados os procedimentos para a simulação de um flutuador com movimento livre, e posteriormente de um flutuador ligado ao PTO.

### 4.1 Teste de validação para flutuadores com movimento livre.

Os testes de validação para flutuadores com movimento livre estão separados em duas secções, inicialmente são feitos testes no domínio das frequências e posteriormente validam-se os procedimentos da resposta a uma onda irregular, no domínio do tempo.

#### 4.1.1 Domínio das frequências.

Depois de efetuada a pesquisa bibliográfica foi escolhido, numa primeira fase, o artigo (Paredes *et al.*, 2008), no qual é usado o programa *WAMIT*, assim como resultados experimentais para no estudo da resposta de um flutuador hemisférico, com vários graus de liberdade. As características do flutuador usado são apresentadas na tabela 4.1. A descrição da superfície é feita através de uma malha composta por 2040 painéis, apresentada na figura 4.1. A profundidade considerada nas simulações numéricas é de 0,35 m.

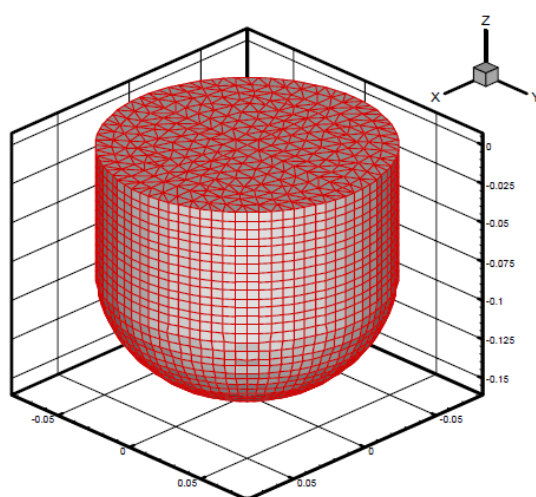


Figura 4.1- Malha utilizada no programa *WAMIT* (Paredes *et al.*, 2008).

Tabela 4.1 – Características do flutuador (Paredes *et al.*, 2008).

Cilindro		Hemisfério	Massa (Kg)	Momentos de inércia (Kg.m <sup>2</sup> )		
Altura (m)	Diâmetro (m)	Diâmetro (m)		I <sub>xx</sub>	I <sub>yy</sub>	I <sub>zz</sub>
0,075	0,075	0,075	2,272	0,03212	0,03080	0,05139

As simulações efetuadas por (Paredes *et al.*, 2008) foram reproduzidas pelo autor, comparando-se os coeficientes hidrodinâmicos de massa adicionada ( $m_a$ ), amortecimento por radiação ( $b_{hid}$ ), o módulo da força de excitação  $F_{ex}$  e o seu ângulo de fase, assim como a amplitude de resposta do flutuador ( $RAO$ ) e o seu ângulo de fase. Devido ao facto dos ficheiros de saída do *AQWA* e do *WAMIT* serem respetivamente dimensionais e adimensionais, procedeu-se à conversão dos primeiros para a sua forma adimensional. Nas equações 4.1 a 4.4. definem-se os parâmetros adimensionais utilizados. Todos os coeficientes são calculados unicamente para o modo de arfagem.

$$m_a^* = \frac{m_a}{\rho d^3} \quad (4.1)$$

$$b_{hid}^* = \frac{b_{hid}}{\rho d^3 \omega} \quad (4.2)$$

$$F_{ex}^* = \frac{F_{ex}}{\rho g d^2} \quad (4.3)$$

$$Frequência\ adimensional = \frac{\omega^2 \cdot d}{g} \quad (4.4)$$

Onde  $m_a^*$  é o coeficiente adimensional de massa adicionada,  $b_{hid}^*$  representa o coeficiente adimensional de amortecimento por radiação,  $\rho$ , a massa volúmica da água salgada (1025 Kg/m<sup>3</sup>),  $d$ , o diâmetro do flutuador,  $g$ , a aceleração gravítica e  $\omega$  a frequência angular.

Numa primeira fase utilizou-se o código *AQWA* para simular o movimento livre do flutuador, utilizando as dimensões físicas do mesmo. Esta estratégia implica que os automatismos programados no *AQWA* provoquem uma geração de uma malha mais grosseira do que a utilizada por (Paredes *et al.*, 2008). Nestas condições, no *AQWA*, a malha é composta apenas por 173 elementos (no *WAMIT* a malha era composta por 2090 elementos). Nas figuras 4.2 a 4.7 comparam-se os resultados obtidos por (Paredes *et al.*, 2008) no *WAMIT* e no *AQWA* pelo autor.

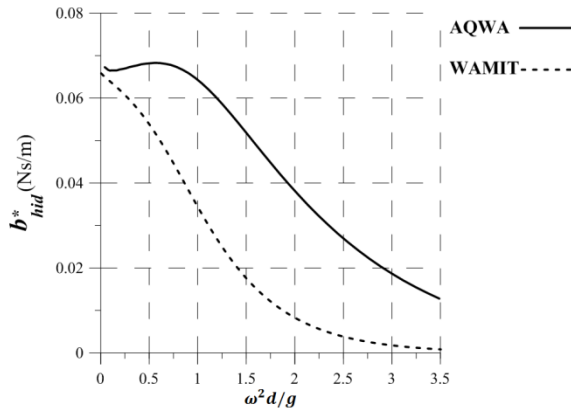


Figura 4.2- Coeficiente adimensional de amortecimento  $b_{hid}^*$ .

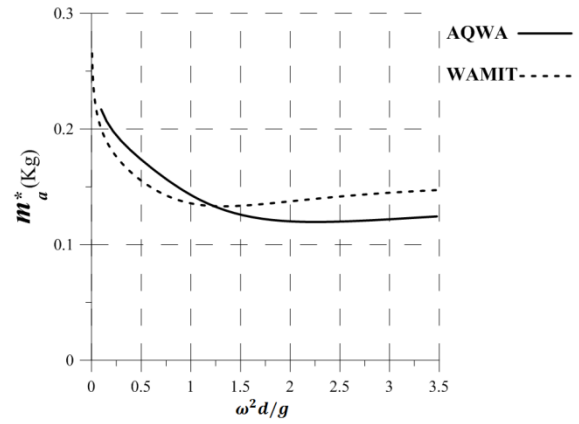


Figura 4.3- Coeficiente adimensional de massa adicionada  $m_a^*$ .

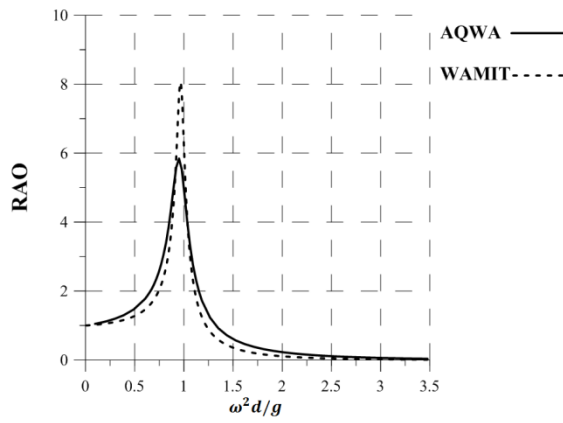


Figura 4.4- Amplitude de resposta (RAO).

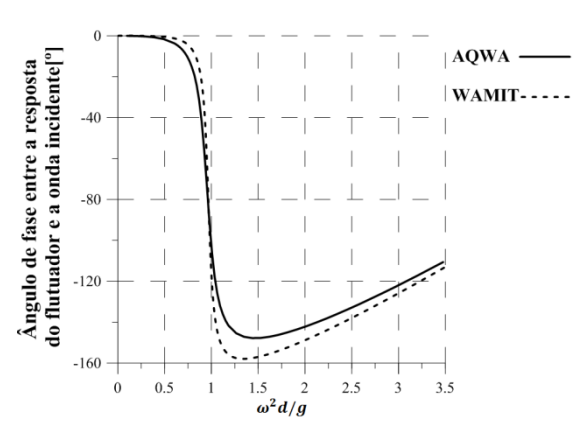


Figura 4.5- Ângulo de fase entre a resposta do flutuador e a onda incidente.

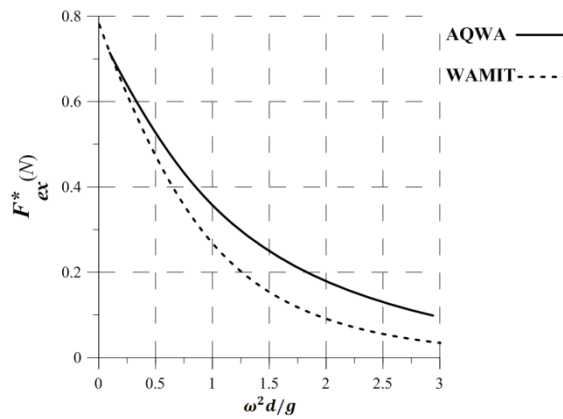


Figura 4.6- Módulo da força de excitação  $F_{ex}^*$ .

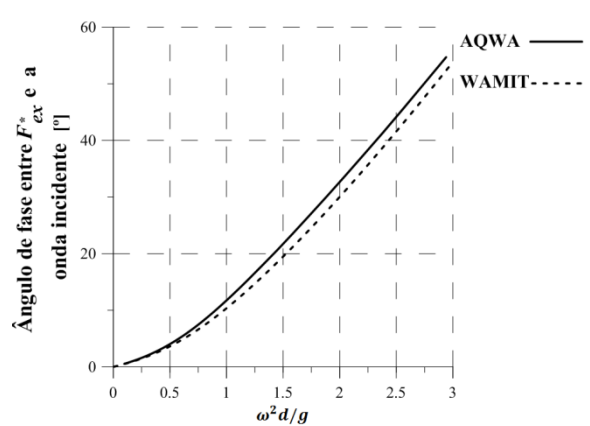


Figura 4.7- Ângulo de fase entre a força de excitação  $F_{ex}^*$  e a onda incidente.

Constata-se que existe uma discrepância generalizada nos resultados, que não obstante apresentam a mesma evolução. Este facto era espectável uma vez que o número de elementos da malha diferia em mais de uma ordem de grandeza.

A forma encontrada para contornar este problema, criado pelos automatismos de geração de malha, foi definir um flutuador dinamicamente equivalente, mas de maiores dimensões. Assim, as variáveis adimensionais 4.1 a 4.4 mantêm-se. Na tabela 4.2 resumem-se as características do flutuador dinamicamente equivalente a simular.

Tabela 4.2 - Características do flutuador a dinamicamente semelhante.

Cilindro		Hemisfério	Massa (Kg)	Momentos de inércia (Kgm <sup>2</sup> )		
Altura (m)	Diâmetro (m)	Diâmetro (m)		I <sub>xx</sub>	I <sub>yy</sub>	I <sub>zz</sub>
2,5	2,5	2,5	85000	178727	178727	168645

Com estas dimensões, conseguiu-se criar uma malha composta por 1940 elementos, próxima dos 2040 elementos na análise no WAMIT. A comparação de valores adimensionais é feita nas figuras 4.8 a 4.13. De frisar que a relação entre a profundidade do mar e o diâmetro do flutuador foi mantido constante em relação ao flutuador anteriormente analisado de menores dimensões.

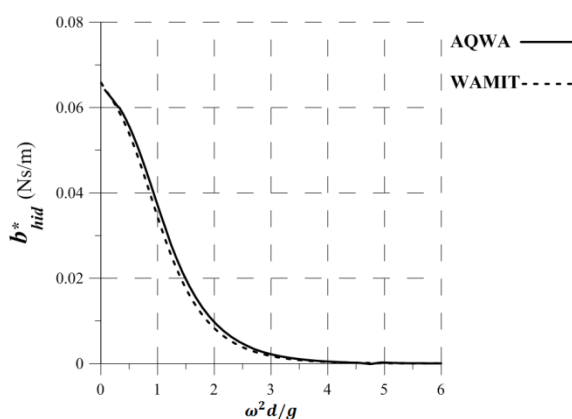


Figura 4.8- Coeficiente adimensional de amortecimento  $b_{hid}^*$ .

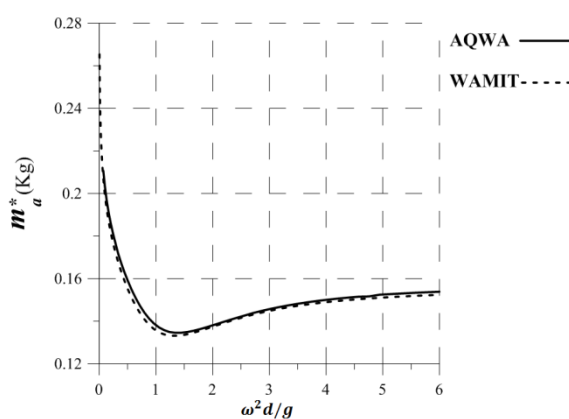


Figura 4.9- Coeficiente adimensional de massa adicionada  $m_a^*$ .



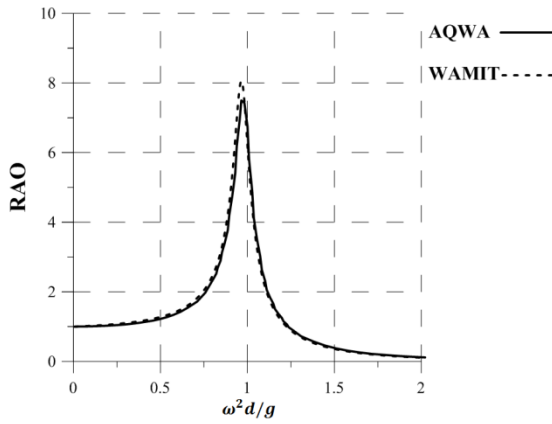


Figura 4.10- Amplitude de resposta (RAO).

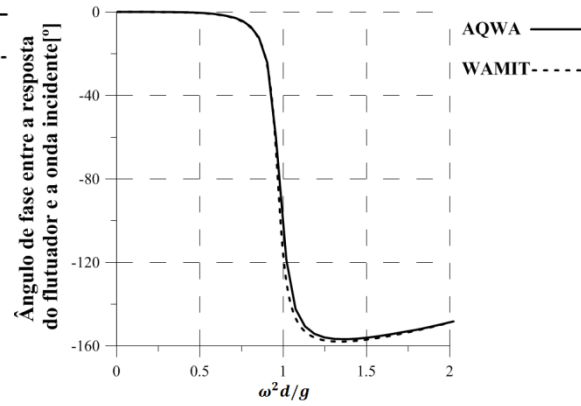


Figura 4.11- Ângulo de fase entre a resposta do flutuador e a onda incidente.

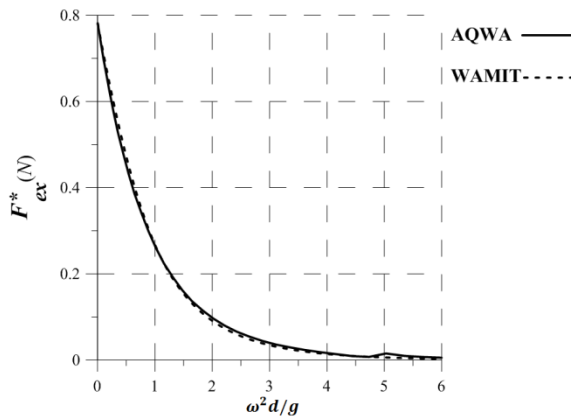


Figura 4.12- Módulo da força de excitação  $F_{ex}^*$

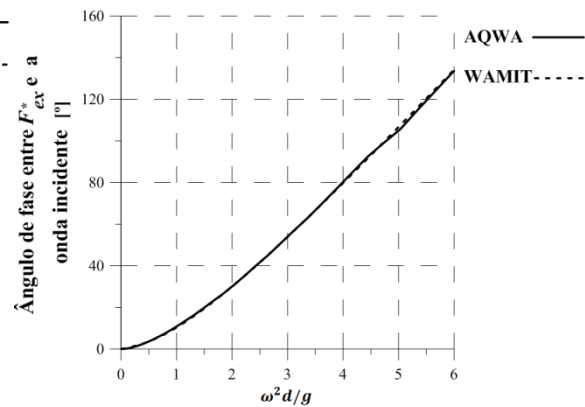


Figura 4.13- Ângulo de fase entre a força de excitação  $F_{ex}^*$  e a onda incidente.

Constata-se através da análise das figuras uma melhoria significativa na concordância entre os resultados do AQWA e do WAMIT. Não obstante a sua semelhança, convém proceder à certificação da sua realidade no ponto de vista físico.

O gráfico dos coeficientes adimensionais de amortecimento hidrodinâmico  $b_{hid}^*$ , figura 4.8, descreve o amortecimento a tender para zero nas frequências altas. Para muito altas frequências, o comprimento característico do corpo será de ordem de grandeza superior ao comprimento de onda gerada, pelo que a geração de ondas é inexistente. Para movimentos de baixa frequência e profundidade infinita, não haverá ondas radiadas. No caso em questão, a profundidade não é infinita, pelo que para baixas frequências não se observa uma convergência para zero.

O gráfico dos coeficientes adimensionais de massa adicionada  $m_a^*$  representado na figura 4.9. denota um valor mínimo para uma frequência adimensional próxima de 1, ou seja, próxima da frequência natural do sistema.

Observando as figuras 4.10 e 4.11, relativos às amplitudes de resposta (*RAO*) e ao seu ângulo de fase com a onda incidente, constata-se que para frequências baixas o flutuador acompanha totalmente a onda, contrariamente ao que acontece para maiores frequências em que o flutuador permanece imóvel. Próximo da frequência adimensional de 1, surge um pico de amplitude. Este facto é acompanhado com uma mudança abrupta de ângulo de fase, na mesma frequência. O pico corresponde ao fenómeno de ressonância, que ocorre na frequência natural do sistema.

Relativamente ao módulo da força de excitação  $F_{ex}^*$  (figura 4.12) constata-se que para frequências altas, o seu valor tende para zero, enquanto que para frequências baixas o seu valor aproxima-se da unidade. Ou seja, quando a ondulação tem baixa frequência, a força de excitação é igual à força hidrostática a atuar no corpo. Relativamente ao ângulo de fase entre a força de excitação e a onda incidente (figura 4.13), este aumenta quase linearmente à medida que a frequência vai aumentando.

Havendo concordância de resultados quer na comparação com (Paredes *et al.*, 2008), que na coerência do ponto de vista físico, pode-se concluir que a validação de procedimentos foi efetuada com sucesso.

No entanto, a análise conduzida baseia-se num flutuador em águas pouco profundas. Houve a necessidade portanto de se efetuar uma análise em maior profundidade, que serve igualmente como validação. Para isso utilizou-se um exemplo retirado de (Falnes, 2002) onde a profundidade tem a dimensão de quinze vezes o raio do flutuador. O flutuador consiste num cilindro vertical sendo as características descritas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Características do flutuador cilíndrico.

Cilindro		Massa (Kg)	Momentos de inércia (Kg.m <sup>2</sup> )		
Altura (m)	Diâmetro (m)		I <sub>xx</sub>	I <sub>yy</sub>	I <sub>zz</sub>
5	5	94020	354349	354349	303728

Para melhor comparação, os gráficos dos coeficientes retirados de (Falnes, 2002) foram sobrepostos aos resultados do AQWA. A adimensionalização é conduzida como anteriormente através das equações 4.1 a 4.4.

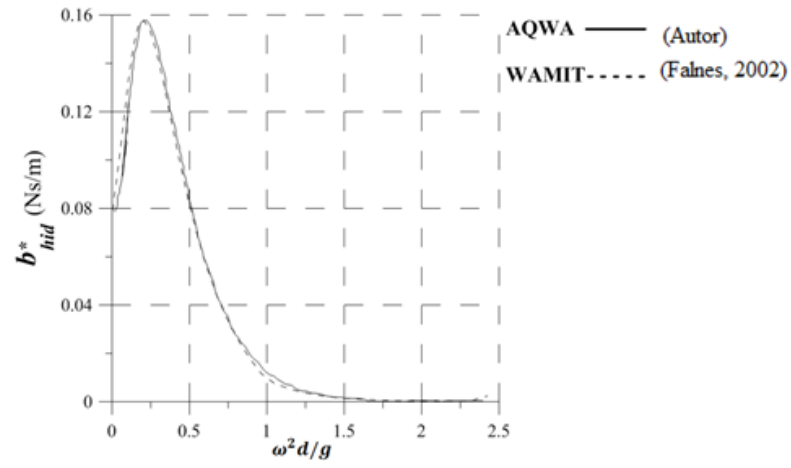


Figura 4.14 - Coeficientes adimensionais de amortecimento hidrodinâmico  $b_{hid}^*$ .

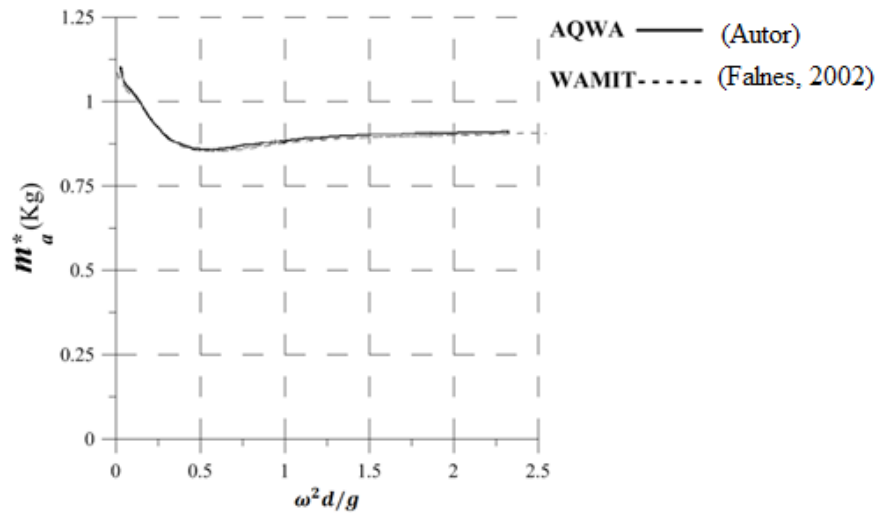


Figura 4.15 - Coeficientes adimensionais de massa adicionada  $m_a^*$ .

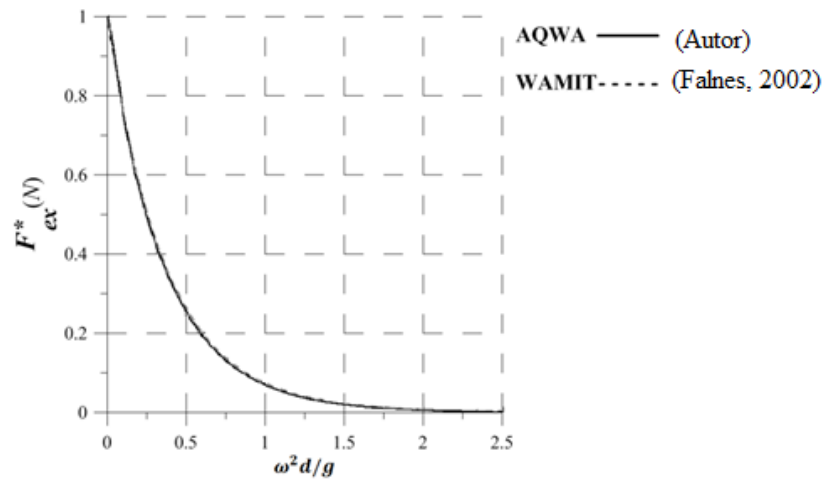


Figura 4.16 - Módulo da força de excitação  $F_{ex}^*$ .

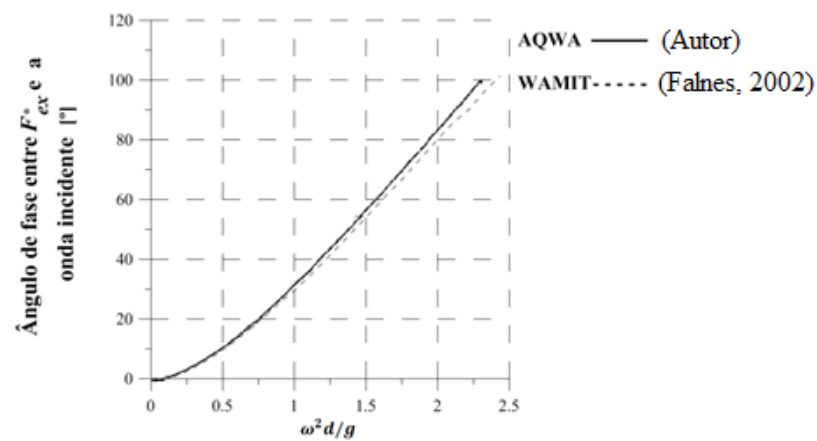


Figura 4.17 – Ângulo de fase entre a força de excitação  $F_{ex}^*$  e a onda incidente.

Através dos testes produzidas ao longo do capítulo constata-se que o programa AQWA é uma ferramenta eficaz no cálculo dos diversos coeficientes hidrodinâmicos, quando comparado com outros programas. No entanto, para estruturas pequenas, a fraca capacidade de gerar malha com elementos de baixa dimensão pode ser um entrave ao cálculo preciso. Constatou-se também que o AQWA produz com eficácia resultados para estudos de baixa e alta profundidade marítima.

### 4.1.2 Domínio temporal

Depois de efetuada a validação no domínio das frequências, procede-se de forma idêntica para resultados no domínio do tempo. Com esse objetivo, foram usados dados bibliográficos (Backer, 2010), onde é simulado um flutuador cônico com as características descritas na tabela 4.4. O programa AQWA permite simular a resposta temporal dos corpos sujeitos à excitação de ondas regulares ou irregulares (definidos de forma espectral). O flutuador foi discretizado com 1660 elementos a que corresponde uma dimensão máxima de 0,35 m. A profundidade foi considerada infinita.

Tabela 4.4- Características do flutuador do (Backer, 2010).

Cilindro		Cone		Massa (Kg)	Momentos de inércia (Kg <sup>m</sup> <sup>2</sup> )		
Altura (m)	Diâmetro (m)	Diâmetro (m)	Altura (m)		I <sub>xx</sub>	I <sub>yy</sub>	I <sub>zz</sub>
1	2,5	2,5	2,5	26760	167251	167251	26760

O flutuador é excitado por uma agitação com características espectrais, típicas de uma distribuição *JONSWAP* caracterizado na tabela 4.5. Nas figuras 4.18 e 4.19 representa-se a resposta em arfagem obtida respetivamente por (Backer, 2010) e pelo autor.

Tabela 4.5- Características do espectro de onda irregular ( $H_s$  a altura de onda significativa,  $f_s$  a frequência de pico) (Backer, 2010).

Tipo de espectro	Frequência inicial (Hz)	Frequência final (Hz)	$H_s$ (m)	$f_s$ (Hz)
<i>JONSWAP</i>	0,05	0,3	2,75	0,1285

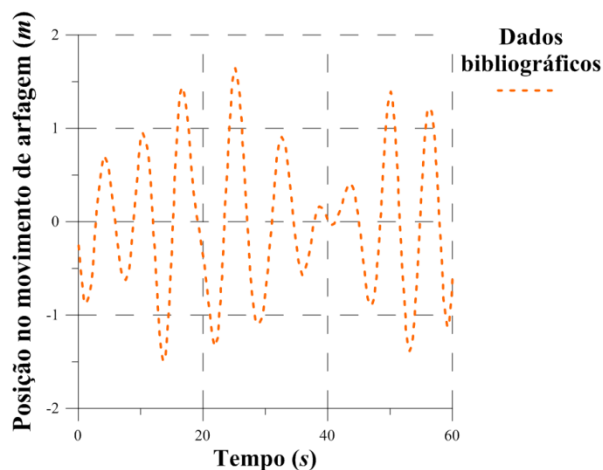


Figura 4.18- Modo de arfagem (Backer, 2010)

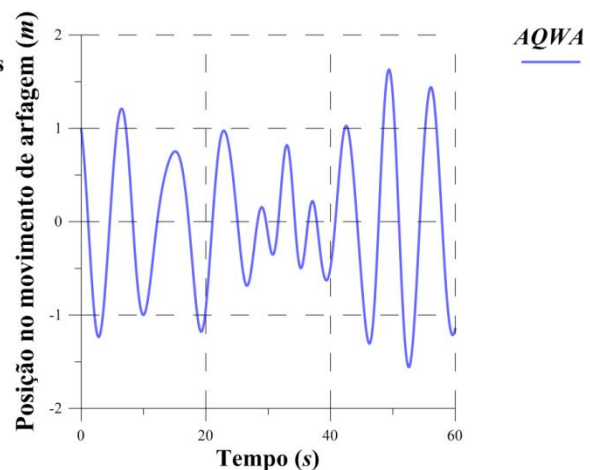


Figura 4.19- Modo de arfagem calculado no AQWA (autor).

Uma vez que no cálculo não foi imposta nenhuma condição inicial (ou seja, a fase de cada harmónica da *JONSWAP* é aleatória) os sinais temporais não têm que se iniciar no mesmo valor. É assim necessário um outro critério para comparar os resultados. O cálculo da distância percorrida pelo centro de massa durante 60 s (equivalente aproximadamente a dez vezes o período de pico do espectro) constitui um forte indicador, pois implica que o movimento foi simulado com precisão.

Foram retirados os pontos da posição do flutuador no modo de arfagem tanto na bibliografia como no *AQWA* e posteriormente foram calculados as diferenças de posição para cada passo de tempo. Os resultados são apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6- Distância percorrida em arfagem calculada pelo autor e por (Backer, 2010).

	<b>Autor</b>	<b>(Backer, 2010)</b>
<b>Distância percorrida</b>	36,30 m	36,77 m
<b>Erro relativo</b>	1,28 %	

Constata-se que a distância percorrida em arfagem calculada no *AQWA* e retirado da bibliografia são muito semelhantes (1,28 %). A coerência dos resultados obtidos permite afirmar que também no domínio do tempo o autor é capaz de simular o movimento de um corpo flutuante livre.

## 4.2 Validação de um flutuador sujeito a ligação com sistema *PTO* (*Power Take-off*).

Nesta secção procede-se a testes da validação de um flutuador sujeito a restrições ao movimento impostas por um sistema *PTO* (*Power Take-off*). A validação é efetuada no domínio de frequências. Não tendo sido encontrado na bibliografia a resposta de um sistema deste tipo com uma caracterização precisa das características do *PTO*, optou-se neste trabalho por comparar os resultados com uma expressão analítica obtida para uma condição ótima.

Foi simulado um flutuador hemisférico com uma ligação a um sistema de extração de energia. As características do flutuador são apresentadas na tabela 4.7. A profundidade foi considerada infinita.

Tabela 4.7- Características do flutuador hemisférico.

<b>Cilindro</b>		<b>Hemisfério</b>	<b>Massa (Kg)</b>
<b>Altura (m)</b>	<b>Diâmetro (m)</b>	<b>Diâmetro (m)</b>	
5	5	5	73504

O sistema *PTO* é caracterizado pelo valor dos coeficientes de amortecimento,  $b_{PTO}$  e elástico  $k_{PTO}$  (considerado nulo neste caso) apresentadas na tabela 4.8.

Tabela 4.8- Características do sistema *PTO*.

$b_{PTO}$ (Ns/m)	$k_{PTO}$ (N/m)
7252,61	0

Na figura 4.20 é apresentada a amplitude de resposta (*RAO*) com e sem *PTO*. Constatase que a extração de energia reduz o pico de amplitude no entanto a frequência de ressonância manteve-se. Estes factos estão de acordo com a intuição física, não sendo no entanto suficientes para dar como terminada a tarefa de validação.

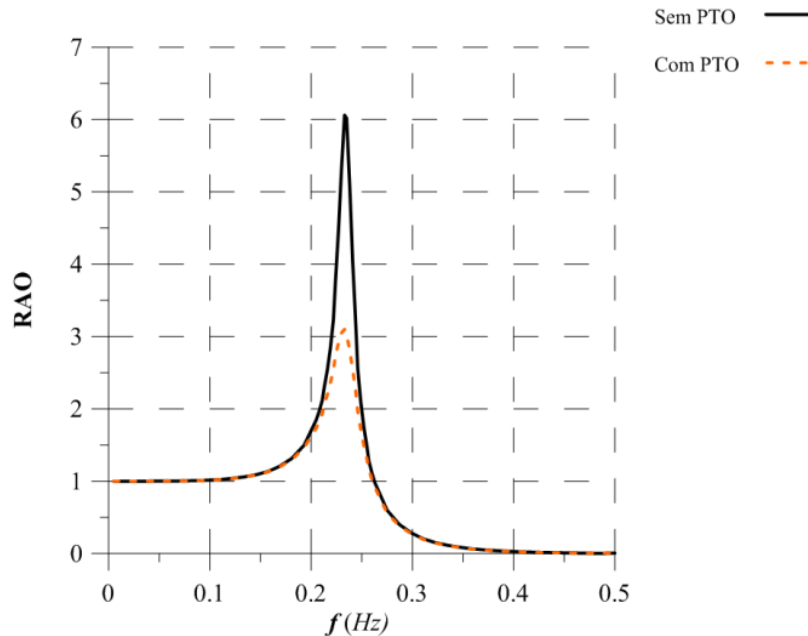


Figura 4.20- Amplitude de resposta (*RAO*) para o sistema com e sem *PTO*.

A escolha de um valor nulo de  $k_{PTO}$  não foi inocente, pois o sistema apresenta assim as mesmas características elásticas, garantindo assim que a sua condição de ressonância se mantém. A velocidade continua em fase com a excitação.

Como visto na introdução desta dissertação secção 2.6.1, a potência absorvida máxima corresponde à situação de ressonância, sendo calculada pela equação 2.53 (Falnes, 2002):

$$P_{abs,máximo} = \frac{|F_{ex}|^2}{8 b_{hid}} \quad (2.53)$$

Sendo,  $F_{ex}$  a amplitude da força de excitação e  $b_{hid}$  o coeficiente de amortecimento hidrodinâmico. Para a situação considerada, a potência absorvida máxima tem o valor de 75561,3 W.

Para a validação calcula-se a potência absorvida através de um método independente. A potência foi calculada através da equação 2.48 estudada na secção 2.6.1 que obriga ao cálculo do movimento do flutuador, constituindo um importante teste à modelação efetuada. O resultado deste cálculo é apresentado na tabela 4.9.

$$P_{abs} = \frac{1}{2} b_{PTO} |\dot{z}|^2 \quad (2.48)$$

Tabela 4.9 – Potência absorvida, potência absorvida máxima e a percentagem de erro entre os dois

	$P_{abs,máxima}$	$P_{abs}$
	75561,3 W	74645,91 W
<b>Erro (%)</b>	1,2 %	

A potência absorvida analisada ocorre na condição de ressonância. Neste ponto, a potência calculada difere apenas 1,2 % da potência máxima. Comprova-se assim que a potência, obtida através dos resultados do AQWA é coincidente à potência máxima calculada analiticamente nas condições ideais.

De acordo com estes resultados, o programa parece simular com rigor um sistema de extração de energia.



## 5. Resultados

Neste capítulo exemplifica-se o dimensionamento de um sistema *PTO* sob a ação de agitação regular e irregular. Escolheram-se dimensões para o flutuador compatíveis com os necessários processos de fabricação, transporte e ancoragem. Assim foi escolhido o flutuador apresentado na figura 5.1. A massa do flutuador é de 46774 Kg, com um calado de 4 m. A profundidade é considerada infinita.

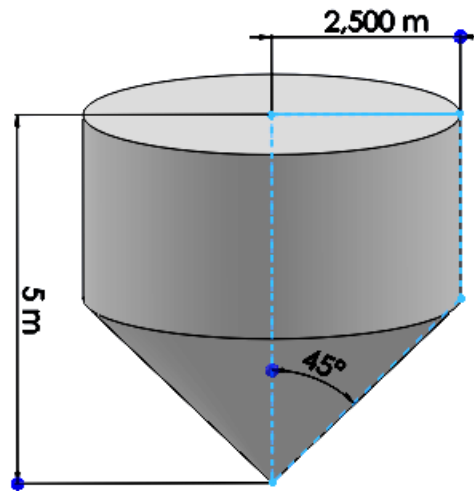


Figura 5.1 – Dimensões do flutuador cônico.

As equações (2.54), apresentadas na secção 2.6.1 permitem identificar as condições de funcionamento ótimas do sistema *PTO*.

$$\text{Coeficientes ótimos do } PTO = \begin{cases} k_{PTO} = \omega^2(m + m_a) - k \\ b_{PTO} = b_{hid} \end{cases} \quad (2.54)$$

Na prática, é difícil projetar um sistema que varie as suas características elástica e dissipativas em função da frequência de excitação, portanto é difícil construir um sistema que obedeça às equações 2.54.

Devido a estas limitações práticas, vão ser apenas considerados sistemas com  $k_{PTO}$  e  $b_{PTO}$  constantes.

Definido o problema, determinou-se como primeira indicação do comportamento do sistema a resposta do flutuador livre (sem restrição de *PTO*), que se representa na figura 5.2:

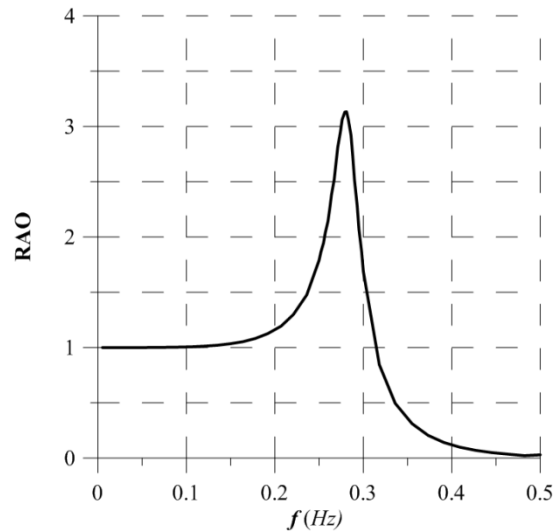


Figura 5.2 – RAO do flutuador com movimento livre.

Por observação da figura 5.2, identifica-se que a frequência natural do flutuador é aproximadamente de 0,271 Hz. Considerando que um clima de ondas rentável no pondo de vista do investimento tem frequência de pico tipicamente de aproximadamente 0,1 Hz, podemos concluir que este flutuador não apresenta características ressonantes para a frequência relevante. Não obstante a teoria indicar *a priori* que este flutuador acoplado a um PTO sem características elásticas permite obter um rendimento muito baixo opta-se por simulá-lo numericamente, com o objetivo de comparar a potência absorvida com a otimizada. Assim, consideram-se três situações:

- **Situação A** – Flutuador ligado a PTO, sem componente elástica ( $k_{PTO} = 0$ ) e com componente dissipativa constante e determinada pela expressão ( $b_{PTO} = b_{hid}$ ).
- **Situação B** – Flutuador ligado a PTO com coeficiente elástico constante ( $k_{PTO} = \omega^2(m + m_a) - k$ ) e com componente dissipativa constante  $b_{PTO} = b_{hid}$ .
- **Situação C** – Flutuador ligado a PTO sem componente elástica ( $k_{PTO} = 0$ ), com componente dissipativa constante determinada pela expressão ( $b_{PTO} = b_{hid}$ ) e com a aplicação de uma massa adicional ( $m_{PTO}$ ).

A determinação de  $k_{PTO}$  ótimo é efetuada de forma a que a frequência natural do sistema coincida com a frequência da onda incidente.

A massa adicional  $m_{PTO}$  é incluída no sistema por forma a alterar a sua frequência natural, à semelhança de  $k_{PTO}$  na situação B. A inclusão dessa massa deverá ser incluída de forma a não alterar a linha de água do flutuador. Este aspeto é fundamental, pois alterando a linha de água, alteram-se também as características hidrodinâmicas do flutuador. Assim, durante o projeto deve ser concebida uma solução, por exemplo um suporte mecânico suspenso que crie condições para que não se altere a cota submersa do flutuador.

## 5.1 Resposta a uma onda regular

### 5.1.1 Situação A

#### ▪ Análise da resposta

Nesta secção é simulado o flutuador apresentado na figura 5.1 ligado a um sistema *PTO* com as características:

- Componente dissipativa determinada pela condição  $b_{PTO} = b_{hid}$ , obtido através do *AQWA* para a frequência natural (0,281 Hz), a que corresponde um valor de 11178,764 Ns/m.
- $k_{PTO} = 0$  (*PTO* sem componente elástica).

Inicialmente determina-se a resposta em frequência do sistema, seguidamente apresentam-se algumas respostas temporais e por fim estima-se a potência absorvida.

Na figura 5.3 representa-se o *RAO* do sistema e compara-se com o do flutuador livre, verificando-se que a frequência de pico mantém-se, reduzindo-se a amplificação.

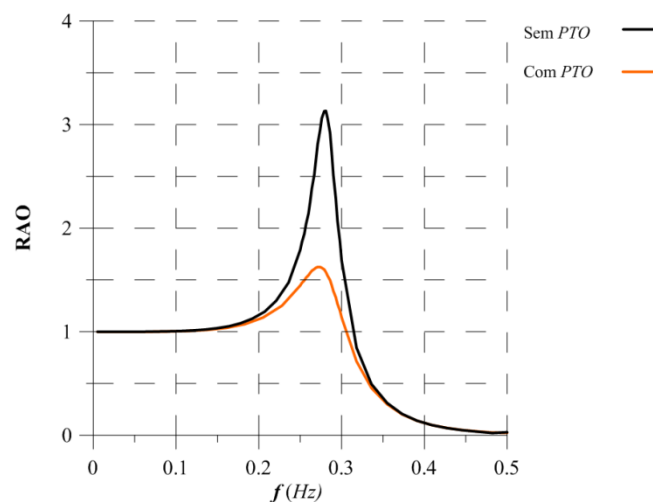


Figura 5.3 – Amplitude de resposta *RAO* com *PTO* ( $k_{PTO}$  nulo).

Fazendo uso das potencialidades do programa optou-se por construir as respostas temporais para três frequências criteriosamente escolhidas, nomeadamente:

## Resultados

- $0,1 \text{ Hz}$  – correspondente a uma frequência mais baixa que a frequência de ressonância (figura 5.4).
- $0,4 \text{ Hz}$  – frequência mais alta que a ressonante (figura 5.5).
- $0,271 \text{ Hz}$  – correspondente à frequência natural (figura 5.6).

Nas figuras 5.4 a 5.6 representam-se respetivamente a excitação e a resposta para cada um dos três casos analisados.

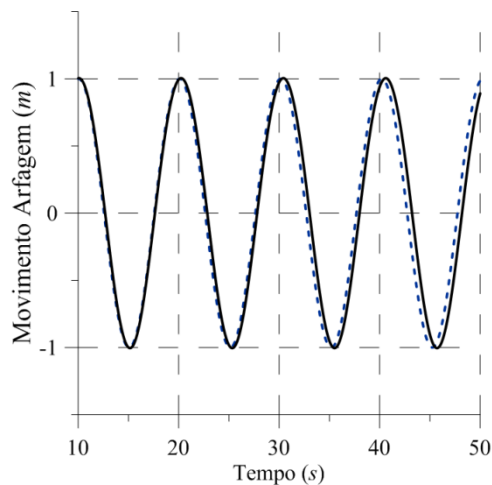


Figura 5.4 – Resposta do flutuador e onda ( $0,1 \text{ Hz}$ ).

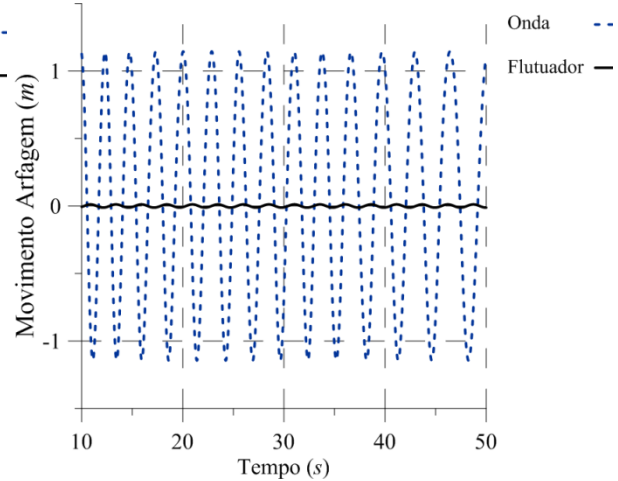


Figura 5.5 - Resposta do flutuador e onda ( $0,4 \text{ Hz}$ ).

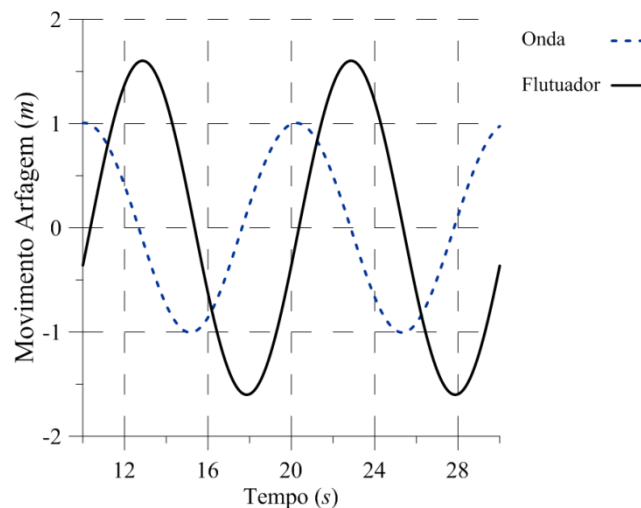


Figura 5.6 - Resposta do flutuador e onda (ressonância).

Para a frequência baixa (figura 5.4), o movimento do flutuador está em fase com a onda incidente, acompanhando a superfície livre. Assim, a sua amplitude de movimento é igual à amplitude da onda. Nesta gama o sistema consegue extrair energia, embora o faça com um rendimento muito baixo.

Para a frequência mais elevada (figura 5.5), o movimento do flutuador é muito reduzido e não está em fase com a onda incidente. A onda tem uma frequência muito alta e o flutuador praticamente não se move, não conseguindo assim converter energia.

Para a frequência de 0,271 Hz (figura 5.6), o movimento do flutuador tem uma desfasagem de 90° com a força de excitação, característica típica de comportamento ressonante. A amplitude do flutuador é maior que a amplitude da onda (cerca de 160 %), evidentemente é nesta frequência que se maximiza a extração de energia.

#### ▪ Potência absorvida

Depois de analisados os movimentos no domínio temporal nas diferentes gamas de frequências, procede-se à obtenção da potência absorvida. O flutuador é excitado por uma onda marítima típica unitária com frequência de 0,1 Hz. Como se pode observar na figura 5.3 a onda incidente tem a frequência natural distante da do sistema (0,271 Hz).

A potência absorvida  $P_{abs}$  é calculada usando a equação 2.48 apresentada na secção 2.6.1.

$$P_{abs} = \frac{1}{2} b_{PTO} |\dot{z}|^2 \quad (2.48)$$

Onde  $\dot{z}$  é a amplitude da velocidade no modo de arfagem obtida através da simulação do AQWA.

Na figura 5.7 apresenta-se a distribuição em frequência da potência absorvida adimensional ( $P_{abs}^*$ ) calculada através da equação 5.1:

$$P_{abs}^* = \frac{P_{abs}}{P_{abs,max}} \quad (5.1)$$

Esta adimensionalização é efetuada através de  $P_{abs,max}$  explicitada na equação 2.53:

$$P_{abs,max} = \frac{F_{ex}^2}{8 b_{PTO}} \quad (2.53)$$

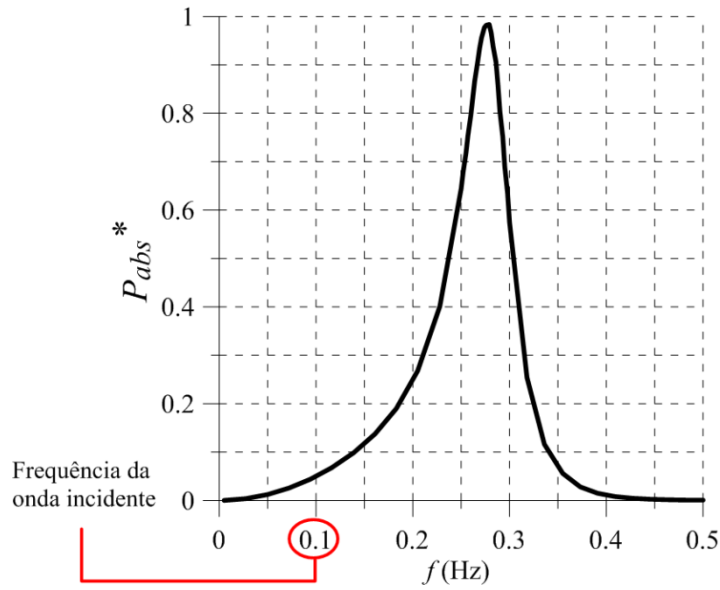


Figura 5.7 – Potência absorvida adimensional ( $k_{PTO} = 0$ ).

Constata-se na figura 5.7 que para a frequência da onda incidente considerada (0,1 Hz) a potência absorvida adimensional é baixa (cerca de 5 % do valor ideal). Isto ocorre pois as características elásticas do *PTO* não são as ideais para a frequência de onda em estudo.

A existência de um máximo com valor aproximadamente de 1 é consequência das escolhas efetuadas para as características elásticas e dissipativas do *PTO* que reproduzem o valor ótimo apenas numa frequência. Como não foram introduzidas características elásticas do sistema ( $k_{PTO} = 0$ ) a frequência natural manteve-se praticamente invariante. Uma outra conclusão a retirar da figura 5.7 prende-se com os valores da potência absorvida tenderem para zero com a diminuição da frequência da onda, apesar do corpo seguir o movimento da superfície livre. Tal facto deve-se à inexistência de movimento relativo entre o corpo e o fluido o que tem como consequência a inexistência de ondas radiadas. Esta observação está de acordo com os conceitos teóricos estudados na secção 2.3.

O programa *AQWA* permite também calcular a potência absorvida no domínio do tempo (figura 5.8). Pelo facto de a excitação ser provocada por uma onda regular, seria possível reproduzir essa evolução temporal com base na análise de frequências da figura 5.7. O valor obtido no gráfico (depois de dimensionalizado) corresponde à amplitude da potência absorvida, esse valor é 1926 W como se constata através da figura 5.8.

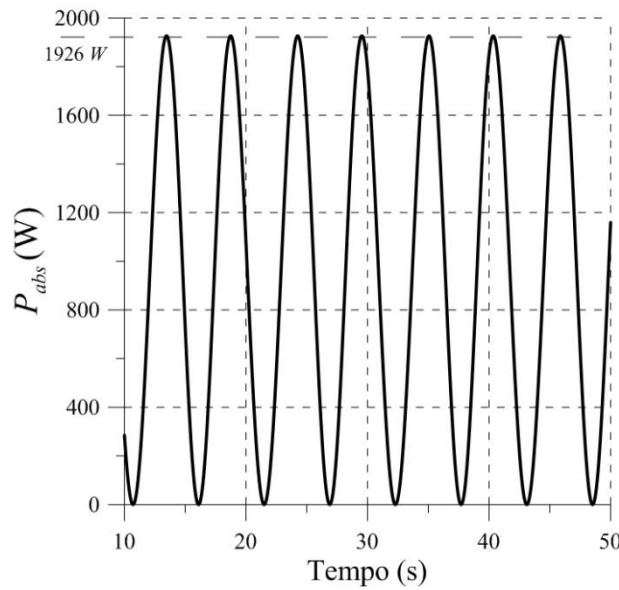


Figura 5.8 – Potência absorvida ao longo do tempo ( $k_{PTO} = 0$ ).

Constata-se que no domínio do tempo, a potência absorvida varia entre 0 W e 1926 W, e a frequência equivale ao dobro da frequência da onda incidente, pois a extração de energia é igual nas cavas e nas cristas, o que faz corresponder a uma frequência dupla.

Como seria de esperar, a potência absorvida é baixa por não haver comportamento ressonante. Na análise da situação B (secção 5.1.2), poderá ser verificado que essa condição é essencial nos ganhos de potência.

### 5.1.2 Situação B

Na secção 5.1.1 confirmou-se a baixa eficiência do sistema nas condições da situação A. Introdz-se agora a componente elástica, verificando-se a sua melhoria.

#### ▪ Análise da resposta

Como apresentado no início do capítulo 5, a equação 2.54 permite determinar as características do PTO de forma a provocar um comportamento ressonante. A utilização do programa AQWA permite obter os coeficientes hidrodinâmicos do flutuador ( $m_a$  e  $k$ ).

$$k_{PTO} = \omega^2(m + m_a) - k \quad (2.54)$$

## Resultados

Nesta secção é simulado o flutuador apresentado na figura 5.1 ligado a um sistema *PTO* com as seguintes características:

- $k_{PTO} = \omega^2(m + m_a) - k$ , calculado por forma a provocar um comportamento ressonante, ou seja, fazer coincidir a frequência natural com a de excitação considerada de 0,1 Hz. Daqui resulta  $k_{PTO} = -167872 \text{ N/m}$ .
- Componente dissipativa determinada pela condição  $b_{PTO} = b_{hid}$ , este valor é obtido através do *AQWA* para a frequência de 0,1 Hz, a que corresponde  $b_{PTO} = 3622,37 \text{ Ns/m}$ .

O sinal negativo indica que neste caso será necessário fornecer energia para o controlo da frequência natural, o sistema teria assim de ter um atuador com componente elástica.

A simulação numérica com o *AQWA* permitiu calcular a resposta em frequência que na figura 5.9 é comparada com a da situação A:

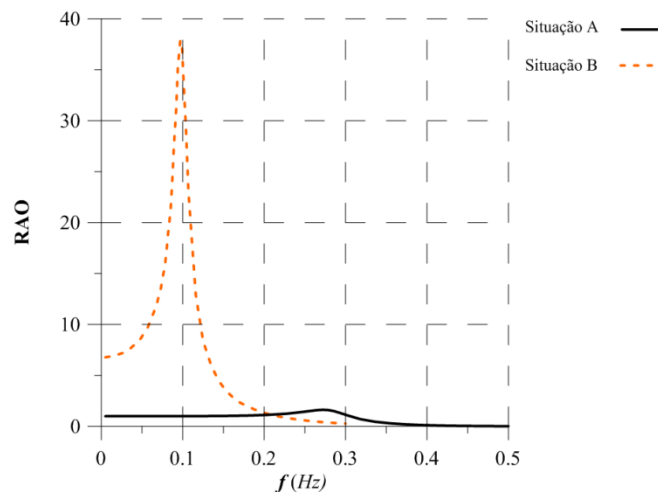


Figura 5.9 - Amplitude de resposta *RAO* na situação A e B.

Constata-se na figura 5.9 que, embora se trate do mesmo flutuador com as mesmas características geométricas e hidrodinâmicas, as alterações feitas no *PTO* modificam drasticamente a resposta do sistema.

Verifica-se ainda que, como pretendido, o pico da amplitude de resposta coincide com a frequência da onda incidente (0,1 Hz) e que a amplitude de resposta é muito superior ao da situação A, o que é característico da ressonância.

Para reforçar estas conclusões compara-se na figura 5.10 o movimento da superfície livre e a resposta do flutuador no domínio do tempo, para a frequência de 0,1 Hz.



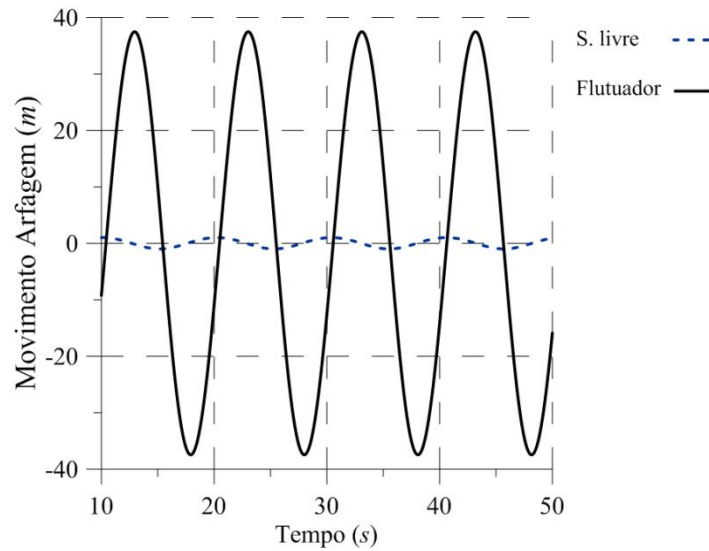


Figura 5.10 - Resposta no tempo do flutuador e da superfície livre (ressonância).

Repare-se na elevada amplitude do flutuador (40 m) em comparação com a amplitude unitária da onda incidente. Esta grande amplitude, embora prevista pela teoria linear, carece de realidade física. O campo de velocidades na vizinhança do corpo que resultaria deste movimento induziria efeitos viscosos importantes, a criação de vórtices e a separação do escoamento. Na realidade estas amplitudes seriam menores e o escoamento não poderia ser modelado por um código linear.

A razão para a previsão linear da amplitude ter um valor tão alto é justificada observando a equação de movimento (equação 2.42):

$$\dot{z} = \frac{F_{ex}}{\left[ (b_{hid} + b_{PTO}) + j \left[ \omega(m + m_a) - \frac{k + k_{PTO}}{\omega} \right] \right]} \quad (2.42)$$

Em ressonância a componente imaginária é zero, logo a equação da velocidade resume-se a:

$$\dot{z} = \frac{F_{ex}}{(b_{hid} + b_{PTO})} \quad (5.2)$$

Como  $b_{hid}$  é muito pequeno para baixas frequência e  $F_{ex}$  alto, resulta que a amplitude da velocidade seja bastante elevada.

### ▪ Potência absorvida

À semelhança do efetuado para a situação A apresenta-se o gráfico da potência absorvida adimensional (figura 5.11):

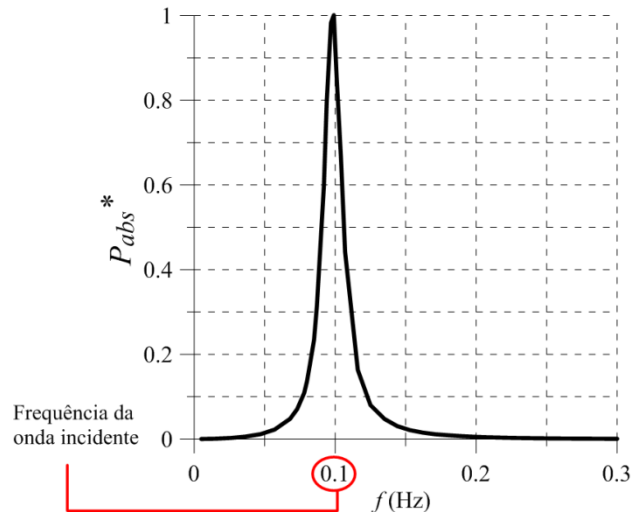


Figura 5.11 - Potência absorvida adimensional ( $k_{PTO}$  ideal).

Comparando a figura 5.11 com a figura 5.7 (resposta no domínio das frequências) conclui-se que com a nova condição de  $k_{PTO}$  cumpre-se o objetivo de otimizar a potência absorvida. Essa potência, para a frequência de 0,1 Hz corresponde à potência máxima de 984350,2 W, o que representa um aumento de cerca de 500 vezes, quando comparado com um sistema *PTO* da situação A.

### 5.1.3 Situação C

Na secção anterior impôs-se um coeficiente elástico  $k_{PTO}$  para o *PTO* que ajustou a frequência natural do sistema à excitação. Nesta secção é introduzida uma massa suplementar  $m_{PTO}$  pretendendo-se de igual forma ajustar a frequência natural.

No programa *AQWA* essa massa é simplesmente incluída nas equações de movimento, no entanto o valor do calado mantém-se. Esta situação na prática só é conseguida com um sistema mecânico que sustente o flutuador não permitindo assim a sua submersão adicional. Desta forma o sistema mantém as suas características hidrodinâmicas.

O cálculo do valor dessa massa suplementar  $m_{PTO}$  é obtida através da equação 2.50 que garante a condição de ressonância (componente imaginária da velocidade igual a zero):

$$\omega(m + m_a) - \frac{k + k_{PTO}}{\omega} = 0 \quad (2.50)$$

Admitindo que o coeficiente elástico  $k_{PTO}$  é zero e introduzindo a massa suplementar  $m_{PTO}$  na equação 2.50 chega-se a:

$$\omega(m + m_a + m_{PTO}) - \frac{k}{\omega} = 0 \quad (5.3)$$

Resolvendo em ordem a  $m_{PTO}$  obtém-se o valor da massa suplementar que garante o ajuste entre a frequência natural do sistema com a frequência da onda incidente:

$$m_{PTO} = \frac{k}{\omega^2} - m - m_a \quad (5.4)$$

Em que  $k$  representa o coeficiente de restituição,  $\omega$  a frequência angular da onda incidente,  $m$  a massa do flutuador e  $m_a$  a massa adicionada do sistema.

#### ▪ Análise da resposta

Para esta configuração do sistema, as suas características são:

- Massa suplementar de acordo com a equação 5.4:  $m_{PTO} = 424494,45 \text{ Kg}$ .
- Componente dissipativa determinada pela condição  $b_{PTO} = b_{hid}$ , obtido através do AQWA para a frequência da onda incidente (0,1 Hz), a que corresponde um valor de 3622,37 Ns/m.
- $k_{PTO} = 0$  (PTO sem componente elástica).

O valor da massa suplementar é da ordem de grandeza superior à massa do flutuador o que permite concluir a estratégia de introduzir uma massa suplementar não é realista. Uma outra hipótese de ajustar as características ressonantes através da variação de massa do flutuador seria variar as suas características geométricas, aumentando o diâmetro. Em (Silva, 2013) este método foi implementado, obtendo-se diâmetros irrealistas de aproximadamente 60 m. A adaptação da frequência natural tem assim de passar por dotar o sistema de mecanismos de controlo que permita colocar em fase a velocidade e a força de excitação, que integrem também as características elásticas  $k_{PTO}$ . Não obstante a referida impossibilidade prática, opta-se por aplicar esta estratégia ilustrando assim as capacidades do modelo de simulação desenvolvido, ainda que numa situação irrealista.

Utilizando o AQWA é calculada a resposta do sistema na situação C, comparando-se na figura 5.12 com os resultados obtidos para as situações A e B (secções 5.1.1 e 5.1.2):

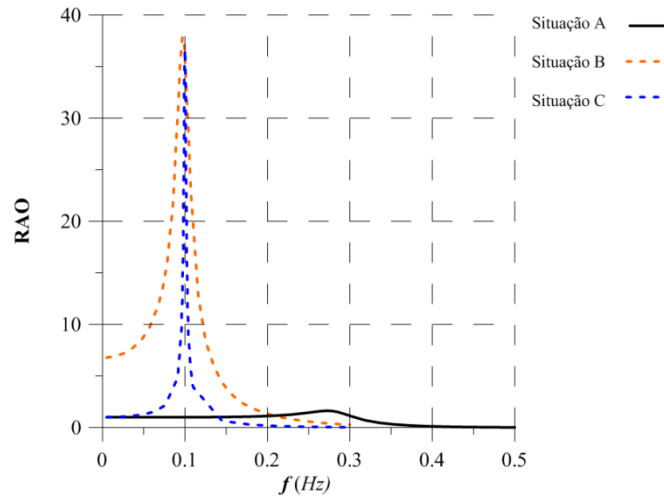


Figura 5.12 – Comparação de  $RAO$  entre a situação A, B e C

Através da figura 5.12 contata-se que incluindo a massa suplementar  $m_{PTO}$  ajusta-se a frequência natural do sistema para os 0,1  $Hz$  à semelhança da situação B. O valor de  $RAO$  é também equivalente, no entanto a largura do pico é menor, ou seja, para as frequências na vizinhança da frequência natural a amplitude é significativamente menor que a correspondente à situação B.

#### ▪ Potência absorvida

A partir da resposta em frequência, calculou-se a potência absorvida adimensional (figura 5.13) de forma idêntica à das secções 5.1.1 e 5.1.2, usando a equação 5.1:

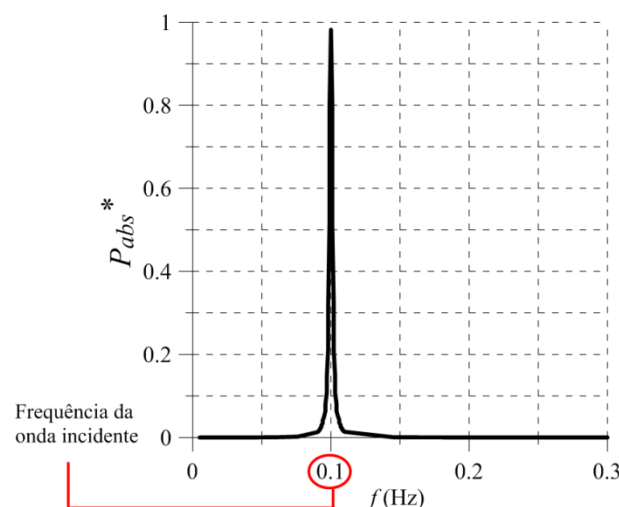


Figura 5.13 – Potência absorvida adimensional (situação C)

Comparando as figuras 5.13 e 5.11, constata-se que a banda de frequência onde o sistema é eficiente é mais larga quando se adota a estratégia B relativamente à C. No entanto, a potência máxima corresponde a 980332,8 W, divergindo apenas em 0,4 % da situação B.

Na próxima secção estuda-se a resposta do sistema a uma situação de mar real, a largura de banda das respostas para as situações A, B e C desempenha um papel importante na eficiência do sistema. Tal situação, como foi visto, não tem evidentemente influência para ondas monocromáticas.

## 5.2 Resposta a ondas irregulares.

Nesta secção será calculada a resposta e a potência absorvida pelos três sistemas introduzidos no início do capítulo, sujeitos a um clima de ondas real. No primeiro caso a frequência natural do sistema não está adaptada à gama mais energética de frequências da excitação (**situação A**), no segundo esta frequência está adaptada ao estado de mar, por ação de uma componente elástica (**situação B**), no terceiro, esta adaptação faz-se com a inclusão de uma massa suplementar (**situação C**).

Serão também calculados os espectros de amplitude da resposta para essas situações. Os movimentos de arfagem são calculados com o programa *AQWA* e os espectros são obtidos através do programa *Matlab* utilizando um algoritmo *FFT* (*Fast Fourier Transform*).

### 5.2.1 Clima de ondas.

Para este estudo é necessário caracterizar o clima de ondas a analisar. Conhecidas as características espectrais da agitação o sistema deve ser projetado selecionando o estado de mar estatisticamente mais relevante em termos energéticos.

Nos testes a realizar serão utilizados dados reais obtidos ao largo do porto de Leixões (*Henriques et al, 2011*). Os dados estão divididos em 14 estados do mar diferentes (tabela 5.1) caracterizados através da frequência de pico  $f_s$ , e altura de onda significativa  $H_s$ .

Para cada estado do mar é apresentada a probabilidade de ocorrência ( $\Phi$ ) durante um período de amostragem na ordem de anos. O fluxo de energia  $F$  em kW por metro de comprimento de onda, em função da altura significativa e da frequência foi calculado pela equação 2.15:

$$F = \frac{1}{128\pi} \cdot \frac{\rho g^2 H_s^2}{f} \quad (2.15)$$

Onde  $\rho$  representa a massa volúmica,  $g$  a aceleração gravítica,  $f$  a frequência e  $H_s$  a altura de onda significativa. Este é um indicador da capacidade energética da onda incidente.

Tabela 5.1- Características de estado do mar (Henriques et al, 2011)

<i>Estado do mar</i>	$f_s$ (Hz)	$H_s$ (m)	$\Phi$ (%)	$F$ (kW/m)	$\Phi \cdot F$ (kW/m)
<b>1</b>	0,1821	1,1	7,04	6520,04	459,01
<b>2</b>	0,1538	1,18	12,35	8883,467	1097,11
<b>3</b>	0,1290	1,23	8,17	11507,88	940,19
<b>4</b>	0,1588	1,88	11,57	21839,37	2526,81
<b>5</b>	0,1255	1,96	20,66	30036,08	6205,45
<b>6</b>	0,1026	2,07	8,61	40979,64	3528,35
<b>7</b>	0,0864	2,14	0,59	52010,21	306,86
<b>8</b>	0,1245	3,06	9,41	73798,64	6944,45
<b>9</b>	0,1007	3,18	10,07	98537,06	9922,68
<b>10</b>	0,0847	3,29	2,57	125395,9	3222,67
<b>11</b>	0,1016	4,75	4,72	217905,6	10285,14
<b>12</b>	0,0831	4,91	2,81	284666,8	7999,14
<b>13</b>	0,0855	6,99	1,01	560742	5663,49
<b>14</b>	0,0719	8,17	0,39	910940,6	3552,67

Multiplicando a probabilidade de ocorrência pelo fluxo de energia obtém-se um indicador do recurso energético. O estado do mar nº 11 (0,1016 Hz) apesar de não ter maior fluxo energético, é o que apresenta melhores características, pois tem alto teor e elevada probabilidade de ocorrência. É indispensável, numa perspetiva de rentabilidade, que a adaptação da frequência natural do sistema seja feita para esta frequência.

O código AQWA permite calcular a resposta de um flutuador sujeito a uma excitação caracterizada por um espectro de ondas. Assim, usando uma parametrização JONSWAP, o AQWA constrói o espectro com base na altura significativa e na frequência de pico do estado do mar nº11, calculado através da equação 5.5:

$$S_{\zeta}(f) = \alpha_s H_s^2 f_s^4 f^{-5} \gamma^{\beta_s} \exp\left(\frac{-5}{4} \left(\frac{f_s}{f}\right)^4\right) \quad (5.5)$$

Sendo  $\gamma$  o fator de forma de pico no espectro, neste caso será usado  $\gamma = 3.3$  (Backer,2010) que descreve com rigor um espectro real.  $\alpha_s$  e  $\beta_s$  são constantes que dependem de  $\gamma$  e da frequência  $f$ .

Na figura 5.14 é apresentada a reconstrução do espectro de amplitudes de ondas correspondente ao estado de mar nº 11, com frequência de pico de 0,1016  $Hz$ . Este espectro foi desenhado no programa *Matlab*, com base na equação do espectro de energia da equação 5.5.

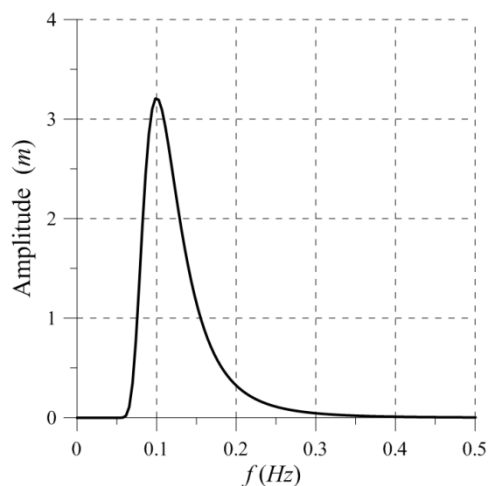


Figura 5.14 – Espectro correspondente ao estado de mar nº 11.

Nas seguintes secções serão analisadas as respostas a este espectro, assim como a respetiva potência absorvida média.

### 5.2.2 Situação A.

Mantendo as características do flutuador apresentadas na figura 5.1, o coeficiente de amortecimento é calculado através da equação 2.46 para a frequência de pico de 0,1016  $Hz$ . As características do *PTO* para esta situação são apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Características do *PTO* (situação A).

$b_{PTO}$ (Ns/m)	$k_{PTO}$ (N/m)	$m_{PTO}$ (Kg)
11178,764	0	0

A resposta em frequência (figura 5.16) pode ser obtida a partir do produto da excitação pelo *RAO*, representados respetivamente nas figuras 5.14 e 5.15.

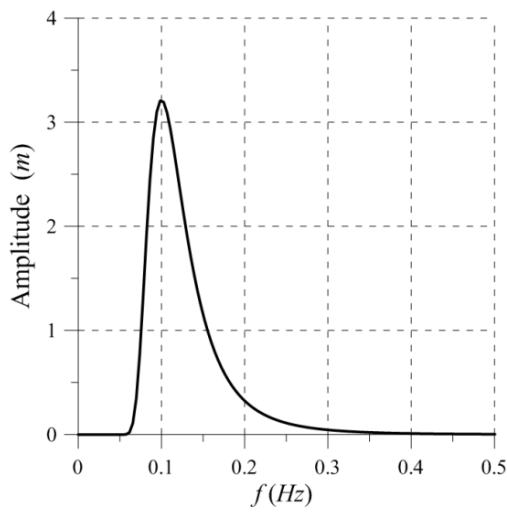


Figura 5.14 – Espectro *Jonswap* do estado de mar nº 11.

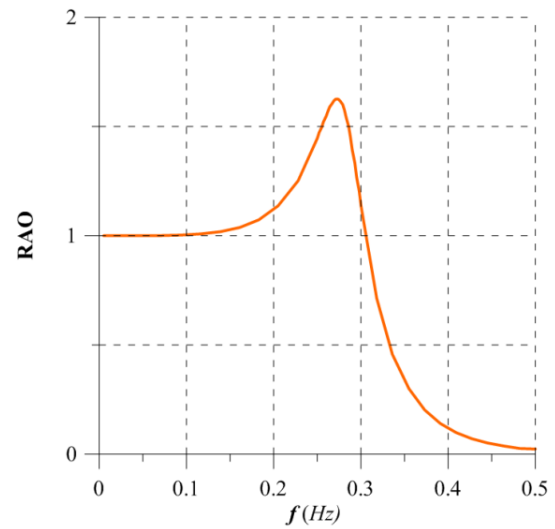


Figura 5.15 – *RAO* na situação A.

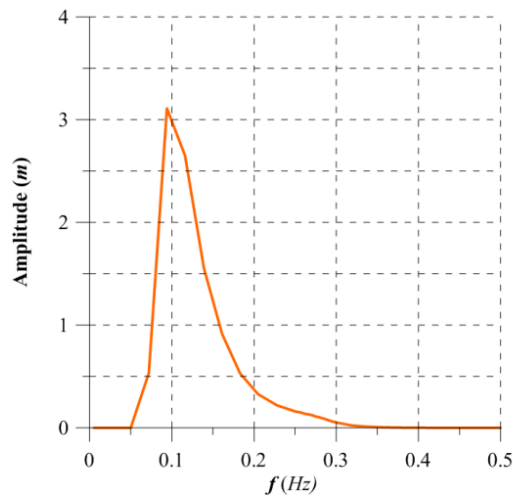


Figura 5.16 – Espectro de resposta para a situação A.

Como se constata na figura 5.15, para a gama de excitação o corpo tem um movimento idêntico ao da superfície livre, desta forma a resposta é idêntica à excitação.

Para situações envolvendo estados de mar definidos através de espectros, o programa *AQWA* permite obter a resposta temporal do flutuador acoplado ao *PTO*. Desta forma, apresenta-se na figura 5.17 a resposta em arfagem do flutuador. O registo temporal tem a duração de 500 s e passo de tempo 0,1 s. Sendo a frequência relevante 0,1016 Hz, a que corresponde o período de 9,8 s, é legítimo de acordo com o teorema *Nyquist* calcular a transformada de *Fourier* e assim caracterizar o movimento no domínio das frequências e assim comparar com o resultado anterior (figura 5.16).



Esta funcionalidade do *AQWA* permite introduzir no domínio do tempo características não lineares (o que não pode ser feito no domínio das frequências), como amarrações, conferindo-lhe uma maior potencialidade de simulação de casos reais. Neste estudo tal não vai ser efetuado, no entanto utiliza-se os resultados no domínio temporal para confirmar os já obtidos no domínio das frequência e de forma a calcular a potência instantânea.

Para tal, o autor desenvolveu uma rotina em *Matlab* que lhe permite calcular os espectros de amplitude que aplicada ao sinal da figura 5.17 resulta no espectro da figura 5.18.

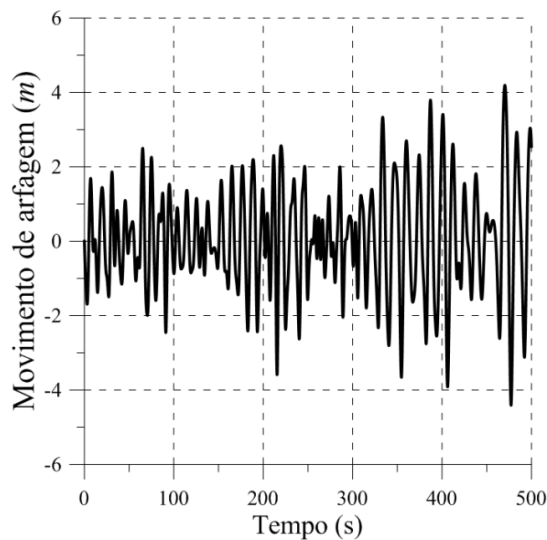


Figura 5.17 – Movimento de arfagem do flutuador (situação A).

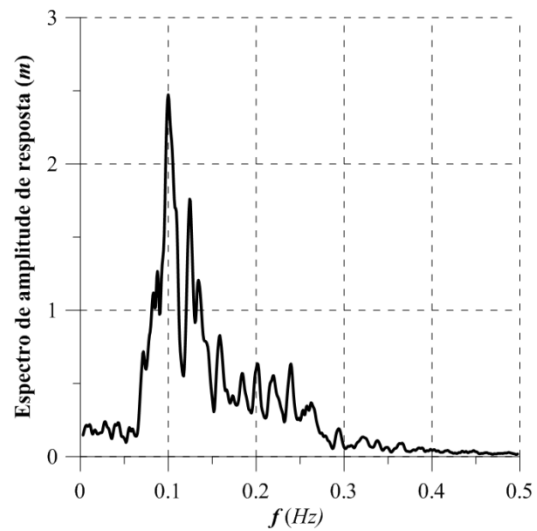


Figura 5.18 – Espectro de amplitudes da resposta (situação A).

Como se pode constatar na figura 5.18, o espectro de resposta apresenta algumas oscilações. Isso deve-se ao facto de serem efetuadas sucessivas transformadas de *Fourier* inversas e diretas. Além disso, o programa *AQWA* utiliza no máximo 50 harmónicas na reconstrução do sinal temporal a partir do *RAO*, o que cria problemas no cálculo na transformada direta associada à determinação do espectro de resposta. Não obstante a resposta representada na figura 5.18 esta é coerente com a da figura 5.16. Ambas apresentam a mesma frequência de pico tendo a amplificação uma diferença de 20 % o que é coerente com os erros inerentes às transformações consecutivas inversas e diretas de *Fourier*.

À semelhança do efetuado na secção 5.1, conhecida a resposta temporal determina-se a potência absorvida ao longo do tempo. A potência é calculada usando a equação 2.48:

$$P_{abs} = \frac{1}{2} b_{PTO} |\dot{z}|^2 \quad (2.48)$$

## Resultados

Para a resposta representada na figura 5.17 apresenta-se na figura 5.19 a potência absorvida ( $P_{abs}$ ) na situação A apenas para um intervalo de tempo entre os 50 s e os 100 s de forma a facilitar a visualização.

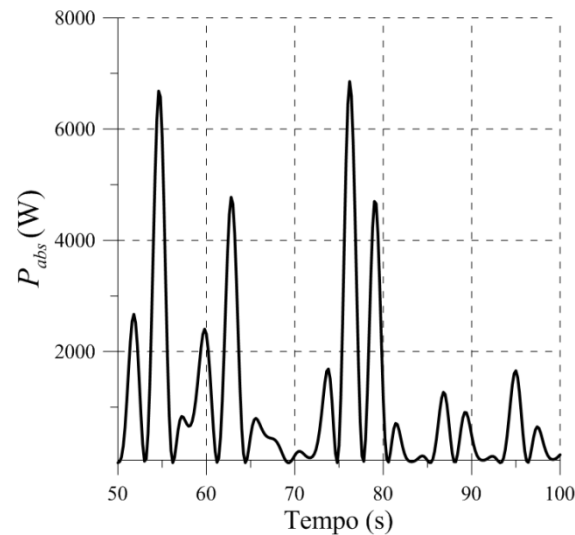


Figura 5.19 – Potência absorvida ao longo de 50 s (Situação A).

Conhecida a potência ao longo do tempo, é fácil calcular a potência absorvida média  $P_{abs,méd} = 7660,25 W$ , este valor é comparado com o obtidos nas situações B e C e que permite caracterizar o desempenho energético.

### 5.2.3 Situação B.

Na última secção calculou-se o movimento do flutuador (figura 5.1) com uma frequência natural não adaptada à gama de frequências do espectro de excitação (Situação A). Nesta secção a adaptação vai ser executada de forma a maximizar a potência absorvida através da introdução de uma componente elástica  $k_{PTO}$ .

Nesse sentido, apresenta-se na tabela 5.3 as características do *PTO* calculados de forma análoga à apresentada na secção 5.1.2.

Tabela 5.3 - Características do *PTO*.

$b_{PTO}$ (Ns/m)	$k_{PTO}$ (N/m)	$m_{PTO}$ (Kg)
3622,37	-167872	0

Na figura 5.21 apresenta-se o espectro de amplitudes da resposta, obtido através do produto entre o espectro de excitação (figura 5.14) e o *RAO* (figura 5.20).

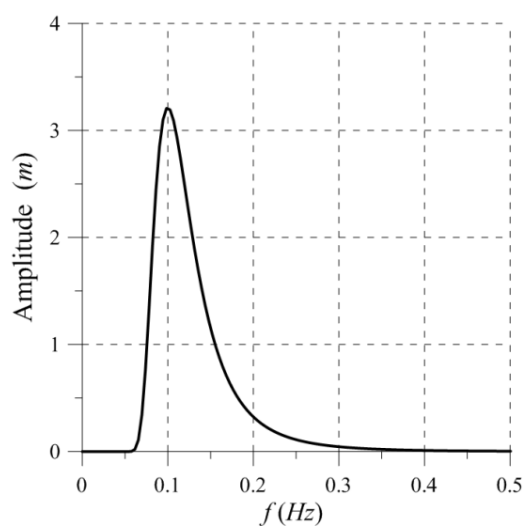


Figura 5.14 – Espectro de ondas do estado de mar nº 11.

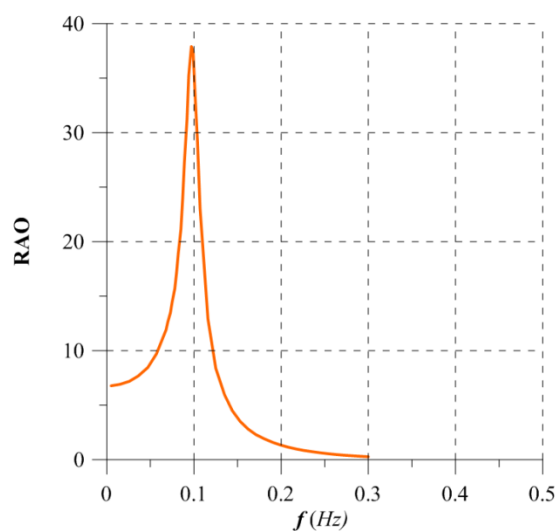


Figura 5.20 –RAO na situação B.

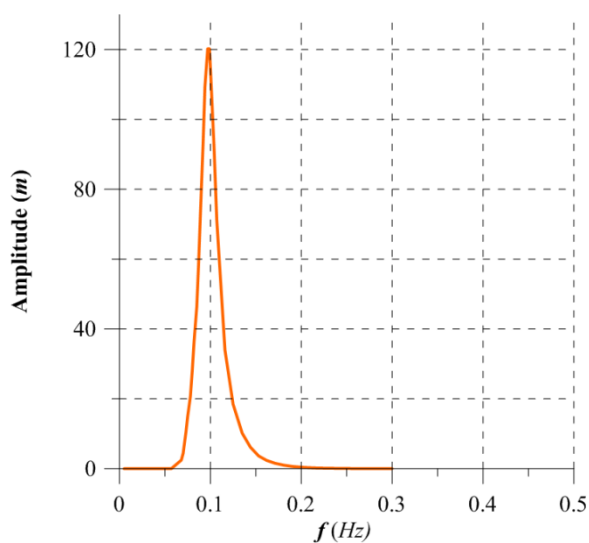


Figura 5.21 – Espectro de resposta para a situação B.

Constata-se na figura 5.21 que a adaptação da frequência natural à frequência de pico do espectro de excitação resulta numa amplificação muito superior quando comparada com o caso anteriormente analisado.

## Resultados

Aplicando uma metodologia idêntica à da secção 5.3.2 obteve-se a resposta no domínio dos tempos e calculou-se, aplicando a rotina *FFT*, o respetivo espectro de amplitude, representados respetivamente nas figuras 5.22 e 5.23.

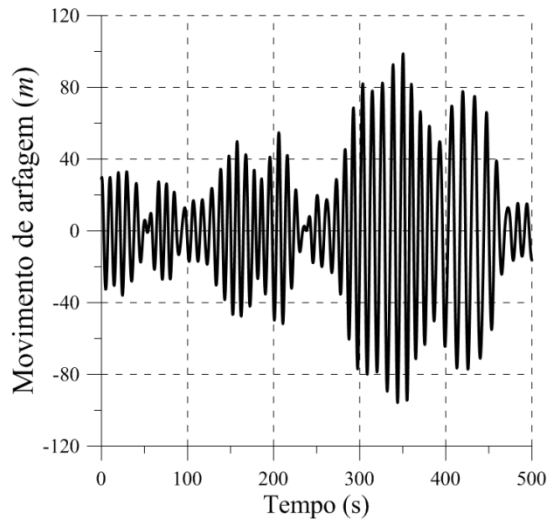


Figura 5.22 – Movimento de arfagem do flutuador.

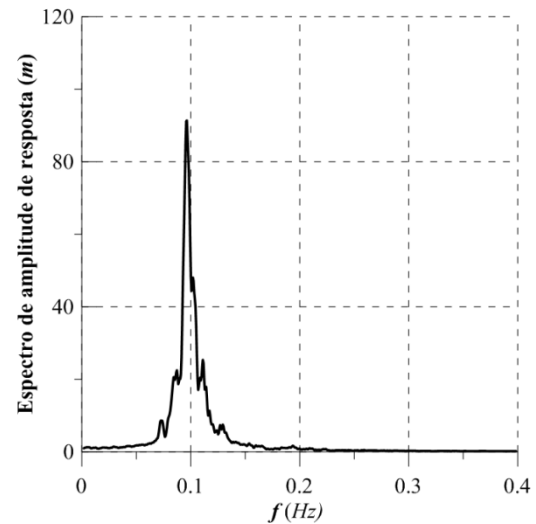


Figura 5.23 – Espectro de resposta (situação B).

A semelhança entre as figuras 5.23 e 5.21 comprova mais uma vez a capacidade do *AQWA* em simular no tempo o movimento do flutuador.

A partir do movimento de resposta temporal calcula-se a potência absorvida instantânea e a potência absorvida média, como já efetuado para a situação A, obtendo-se  $P_{abs,méd} = 743805,82 \text{ W}$ .

### 5.2.4 Situação C.

Nesta secção procede-se à alteração da frequência natural do flutuador para a frequência de pico do espectro em análise, mas ao contrário da situação B, essa alteração não faz com base num coeficiente elástico, mas com a inclusão de uma massa suplementar ( $m_{PTO}$ ). As características do *PTO* são apresentadas na tabela 5.4:

Tabela 5.4 – Características do *PTO* (situação C).

$b_{PTO} \text{ (Ns/m)}$	$k_{PTO} \text{ (N/m)}$	$m_{PTO} \text{ (Kg)}$
3622,37	0	424494,45

O coeficiente de amortecimento  $b_{PTO}$  é determinado usando a condição ideal para a frequência de pico (equação 2.47) e a massa suplementar  $m_{PTO}$  através da equação 5.4.

Na figura 5.25 apresenta-se o espectro de resposta resultante do produto entre o espectro de excitação (figura 5.14) e o *RAO* (figura 5.24).

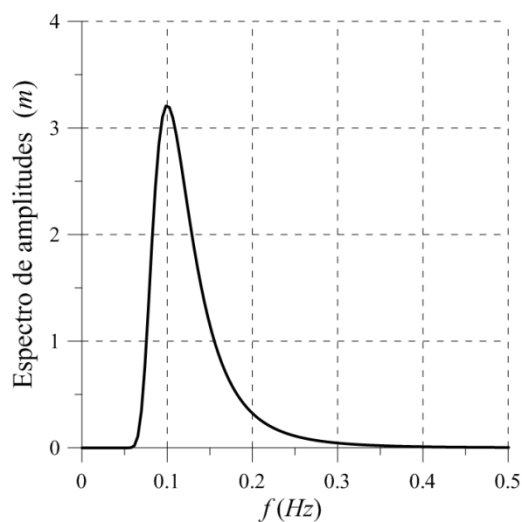


Figura 5.14 – Espectro de ondas do estado de mar nº 11.

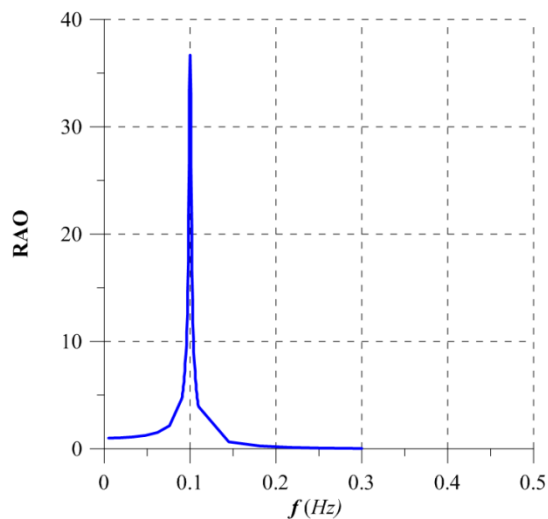


Figura 5.24 –RAO na situação C.

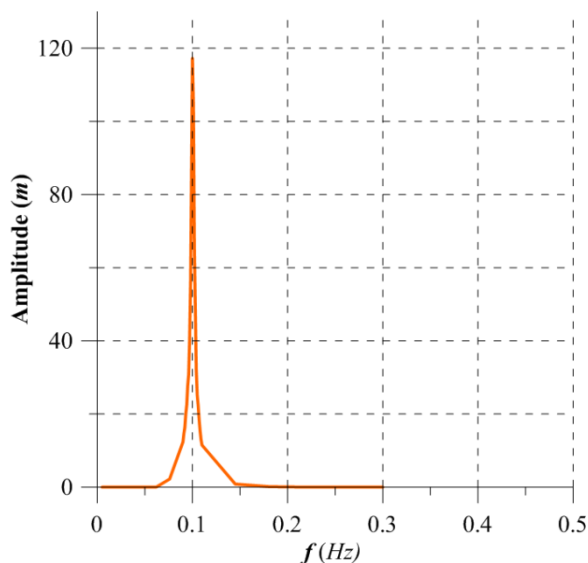


Figura 5.25 – Espectro de resposta para a situação C.

Como se pode constatar através da figura 5.25, a amplificação está maioritariamente concentrada na frequência natural do sistema (coincidente com a frequência de pico do espectro de excitação).

Para as frequências na vizinhança da frequência natural a resposta é consideravelmente menor que na situação B (figura 5.21), esse facto leva a que nesta situação o *PTO* não aproveite a totalidade da energia de excitação, sendo portanto menos eficaz do que na situação B.

## Resultados

Nas figuras 5.26 e 5.27 são apresentadas a resposta de arfagem e o espectro de resposta do flutuador, respetivamente.

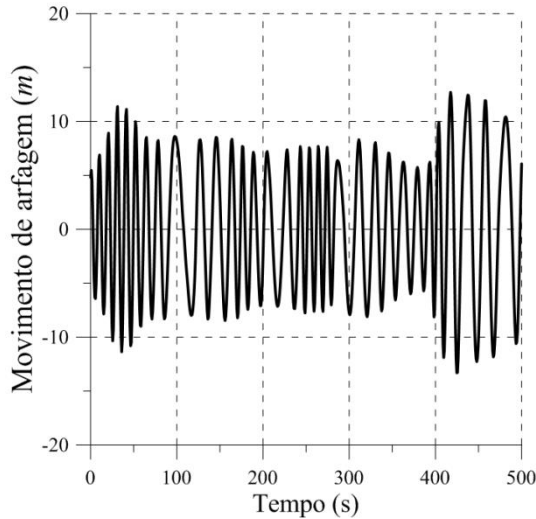


Figura 5.26 – Movimento de arfagem do flutuador.

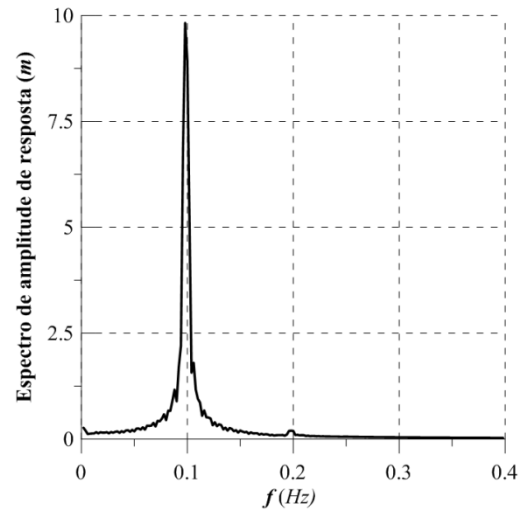


Figura 5.27 – Espectro de amplitudes de resposta (situação C).

A potência absorvida média foi também calculada, à semelhança das situações A e B. Esse valor é apresentado na tabela 5.5, juntamente com a potência das outras situações:

Tabela 5.5 – Potência absorvida média calculada nas situações A,B e C.

Potência absorvida média Na Situação A	Potência absorvida média Na Situação B	Potência absorvida média Na Situação C
7660,25 W	743805,82 W	465586,18 W

A potência média da situação B é cerca de cem vezes superior à situação A. Na situação C também se retiram proveitos da adaptação da frequência natural, no entanto, devido ao estreito pico de *RAO* (figura 5.24) o flutuador não é capaz de responder à maioria das frequências presentes no espectro de ondas de excitação. Tal não acontece na situação B e com isso a sua potência absorvida é cerca de 30 % superior à situação C, apesar de na frequência de pico estes terem uma amplitude semelhante. De notar no entanto que essas amplitudes de resposta são irrealisticamente elevadas na situação B e C, o que viola as hipóteses do modelo linear utilizado.

### 5.3 Diminuição da amplitude de resposta.

As potências absorvidas por um flutuador ligado a um *PTO* com as características correspondentes à situação B foram calculadas nas secções 5.1.2 e 5.2.4. Nesta situação a potência absorvida média é consideravelmente maior que na situação A, no entanto as amplitudes de movimento são demasiado altas (na ordem dos 40 m). Estas amplitudes são irrealistas e põem em causa a validade do modelo linear utilizado.

No entanto, o sistema *PTO* pode limitar substancialmente este movimento, pois retira energia ao corpo. O movimento resultante apresenta amplitudes bem menores, podendo voltar a ser legítimo a utilização de modelos lineares.

Assim, nesta secção pretende-se que a amplitude de resposta (*RAO*), não exceda o valor de 2. Ou seja, que o movimento do flutuador não ultrapasse duas vezes a amplitude da onda incidente, conferindo alguma linearidade ao sistema

O valor de  $b_{PTO}$  que conduz à diminuição da amplitude de resposta é deduzida através da equação de velocidade de arfagem (equação 2.42), já estudada na secção 2.6:

$$\dot{z} = \frac{F_{ex}}{\left[ (b_{hid} + b_{PTO}) + j \left[ \omega(m + m_a) - \frac{k + k_{PTO}}{\omega} \right] \right]} \quad (2.42)$$

Em ressonância a componente imaginária é zero, logo a equação da velocidade resume-se a:

$$\dot{z} = \frac{F_{ex}}{(b_{hid} + b_{PTO})} \quad (5.6)$$

Resolvendo em ordem a  $b_{PTO}$  e sabendo que a relação entre a amplitude de movimento e a velocidade é  $\dot{z} = z \cdot \omega$ , ( $\omega$  é a velocidade angular), temos que:

$$b_{PTO} = \frac{F_{ex}}{z \omega} - b_{hid} \quad (5.7)$$

A equação 5.7 é uma ferramenta no controlo da amplitude do movimento, basta para isso conhecer os coeficientes da força de excitação ( $F_{ex}$ ), de amortecimento hidrodinâmico ( $b_{hid}$ ) e a amplitude de movimento desejada ( $z$ ).

Calculou-se que para conseguir uma amplitude de resposta duas vezes superior à amplitude de onda incidente é necessário  $b_{PTO} = 132076,9 \text{ N/m}$ . O ideal para maior extração de energia é de  $1091 \text{ N/m}$ . Na figura 5.28 compara-se a amplitude de resposta (*RAO*) para o sistema *PTO* com o valor  $b_{PTO}$  ideal e o valor que restringe o *RAO* com o valor de 2.

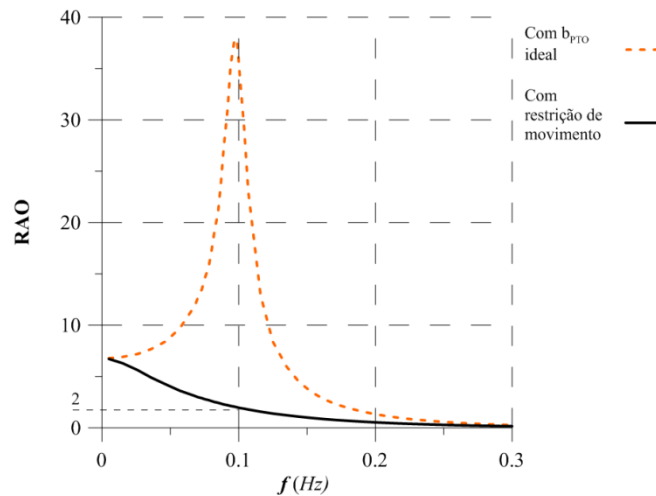


Figura 5.28 – Comparação do *RAO* entre sistemas com e sem restrição de movimento.

A aplicação de um maior coeficiente de amortecimento surtiu o efeito desejado. Para a frequência do estado do mar analisado ( $0,1016 \text{ Hz}$ ), a amplitude de resposta (*RAO*) tem agora o valor de 2. Para frequências muito baixas, a resposta não sofreu alterações, pois as velocidades são menores e assim a força de amortecimento é pequeno. Essa amplitude vai diminuindo até ser nulo, como já acontecia com o sistema ideal. Este método de aplicação de restrição podia ter sido utilizado para qualquer valor de amplitude de resposta diferente de 2.

O flutuador com este sistema de restrição é sujeito ao clima de ondas nº11 da tabela 5.1. Visto que a amplitude da onda na frequência de pico é  $4,75 \text{ m}$  e sendo o *RAO* igual a 2, a amplitude máxima de movimento não deve ser superior a  $9,5 \text{ m}$ , o que é confirmado na figura 5.29.

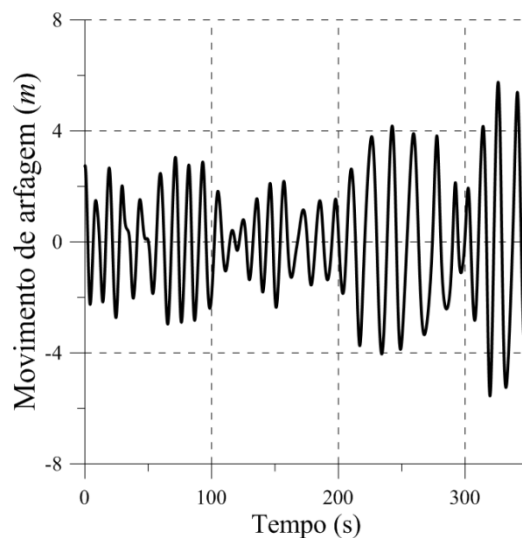


Figura 5.29 - Movimento de arfagem do flutuador.



Com esta excitação, foi calculada a potência absorvida média como já efetuado na secção 5.2.4. O resultado é apresentado na tabela 5.6, onde se compara a potência absorvida através da:

- Situação A.
- Situação B
- Situação B com restrição de movimento.

Tabela 5.6 - Potência absorvida média para os sistemas na situação A, situação B e situação B com restrição de movimentos.

<b><math>P_{abs}</math> média na Situação A</b>	<b><math>P_{abs}</math> média na Situação B</b>	<b><math>P_{abs}</math> média na Situação B com restrição</b>
7660,25 W	743805,82 W	110960,90 W

A potência absorvida média conseguida através de um sistema *PTO* com restrição de movimentos, tem um valor menor que o sistema ideal (situação B). O flutuador restringido consegue ainda uma maior potência absorvida do que o sistema na situação A (sem controlo da frequência natural). O programa *AQWA* pode também ser útil no dimensionamento do sistema considerando deslocamentos fisicamente possíveis como variável de projeto.



## 6. Conclusões e desenvolvimentos futuros.

Através de resultados obtidos nas análises da pesquisa bibliográfica, compararam-se as simulações realizadas com o código *AQWA* com resultados validados e publicados por outros autores. Assim, validou-se a qualidade das simulações numéricas para os casos de flutuadores livres e acoplados a um extrator de energia, considerando excitações regulares ou estados de mar definidos através de um espectro. A coerência entre os resultados permitiu adquirir confiança na metodologia adotada e iniciar o estudo de situações não documentadas, que constituem o objetivo deste trabalho.

Os resultados obtidos no domínio da frequência permitem verificar que flutuadores que seguem a onda (movimento relativo muito pequeno) apresentam rendimentos energéticos com ordem de grandeza inferior aos que apresentam comportamento ressonante. Desta forma é imprescindível que o projeto de extratores pontuais tenham em conta a gama de frequências da excitação (estado do mar típico) e a frequência natural do sistema extrator. Só assim o sistema poderá apresentar rentabilidade económica.

O programa *AQWA* permite variar a massa do flutuador e introduzir características elásticas e dissipativas do *PTO*, no entanto estas características são constantes e independentes da frequência. Adotou-se então como estratégia fixar a forma e dimensões do flutuador ajustando o seu comportamento ressonante através do coeficiente de amortecimento do *PTO* ( $b_{PTO}$ ) e de uma massa adicional ( $m_{PTO}$ ). As simulações numéricas efetuadas permitiram concluir que apenas um coeficiente elástico negativo, o que na prática implica o recurso a um atuador, confere características ressonantes ao sistema quando submetido a um estado de mar com gama de frequências na vizinhança de 0,1 Hz.

Também com o objetivo de conferir um comportamento ressonante ao sistema, a estratégia que consistia em acoplar ao flutuador uma massa suplementar, conduziu a valores de massas irrealistas. Conclui-se assim que para a agitação típica da costa portuguesa é impraticável o ajuste da frequência natural através da introdução de massa suplementar.

No que diz respeito às potências absorvidas, estas foram calculadas recorrendo ao movimento do flutuador e concluiu-se que estas são duas ordens de grandeza superiores se a frequência natural do sistema for ajustada a frequência de excitação.

Convém recordar que o modelo analítico em que se apoia o *AQWA* é linear, admitindo pequenos deslocamentos, por conseguinte, para grandes movimentos, como os que ocorrem durante as respostas ressonantes, é irrealista. Não obstante, é evidente que a energia extraída aumenta com a amplitude do movimento do flutuador. Assim, o projeto de um sistema de extração de energia das ondas, após o estudo

linear, tem de passar por uma fase de experimentação física ou alternativamente por uma modelação numérica não linear.

Pretendendo continuar a aplicar o modelo linear desenvolvido, optou-se por impor um limite à amplitude de deslocamentos, calculando-se a potência extraída. A comparação destes resultados com resultados experimentais (infelizmente não disponíveis) permitiria concluir sobre a validade do estudo desenvolvido.

Os desenvolvimentos futuros deste trabalho passam pela inclusão de um maior número de graus de liberdade para o flutuador, nomeadamente cabeceio e avanço-recuo e a determinação das respetivas consequências na extração de energia.

Com o *AQWA* é possível criar e descretizar a superfície do corpo flutuante de forma rápida e fácil. Assim, o estudo das consequências da hidrodinâmica do flutuador no seu movimento, nomeadamente através da alteração dos coeficientes de massa adicionada e de amortecimento permite a otimização da sua forma sendo tema de desenvolvimento futuro.

O *AQWA* permite ainda introduzir os constrangimentos de ancoragem, o que abre interessantes perspectivas de uma simulação mais realista.

O conjunto dos resultados obtidos permitem ao autor concluir que a metodologia desenvolvida com base no programa *AQWA* é suficientemente precisa para uma primeira fase de projeto de um sistema pontual de extração de energia.

Por fim, do ponto de vista pessoal, este trabalho possibilitou ao autor retificar deficiências formativas enquanto aluno, nomeadamente na utilização de simulação numérica e na programação de nível científico.

## Bibliografia

Backer, Griet., 2010. “Hydrodynamic design optimization of wave energy converters consisting of heaving point absorbers”, Tese de Doutorado, Ghent University, Zwijnaarde, Bélgica. pp. 61-66, 51-53, p. 78

C. R. E. S., “European Thematic Network on Wave Energy, Wave energy utilization in Europe, Current Status and Perspective”, Greece, 2002.

Falnes, J., 2002. “Ocean Waves and Oscillating Systems”. Cambridge University Press, pp 58.

Falnes, J., Hals J., 1999. “Wave Energy and its Utilization: A contribution to the EU Leonardo pilot project 1860 Alter ECO”, Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet, 1999. p. 25

Henriques J.C.C., Lopes M.F.P., Gomes R.F.C., Gato L.M.C., Falcão A.F.O., 2011 “Performance evaluation of a two-body heaving wec with latching control using a new numerical method”. In receding of the 9th European Wave and Tidal Energy Conference, 2011

Ikionrenewableenergy, 2010 <http://ikionrenewableenergy.files.wordpress.com>

Santos J. A., “Modelo Numérico do Comportamento de Navios Amarrado”, APMTAC, Portugal: LNEC, 2006.

Journée, J. M.J., Massie, W. W., 2001. *Offshore Hydromechanics*, 1<sup>st</sup> edição, 2001. Pp 215-233

Knappmann, A., 2012. “Assessment of a wave energy converter (WEC) and the influence if its mooring sytem”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Martins, P. T., Lobo, V., 2007. Determinação de parâmetros de comportamento de navios usando redes neurais. Escola Naval, ISEGI.

Méhauté, B. L., “Hydrodynamics and Water Waves”, 1976

Paredes, G., Taveira-Pinto, F., Lopes, M. F. P., Gomes, R. P. F., Gato, L. M. C., 2008. Estudo experimental do flutuador de um sistema offshore de energia das ondas. *3<sup>as</sup> Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*, FEUP, 2008. p 4

## *Bibliografia*

Ponte, J. A. A., 2012. “Desenvolvimento de um novo sistema de aproveitamento de energia das ondas”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Steward, R. H., 2008. *Introduction To Physical Oceanography*, Texas A & M University, 1<sup>st</sup> edição, 2008.

Silva, A., 2013. “Modelação numérica de um dispositivo pontual de aproveitamento de energia das ondas”, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.